

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΑΤΙΝΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ: ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ:

**« Χωρική προσομοίωση της ποιότητας των υδάτων της λίμνης
Καστοριάς »**



ΝΙΚΗ Α.ΜΑΤΖΑΦΛΕΡΗ

ΒΟΛΟΣ 2007

« Χωρική προσομοίωση της ποιότητας των υδάτων της λίμνης Καστοριάς »

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

1. Άρης Ψιλοβίκος, Λέκτορας, Αειφορική Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Επιβλέπων
2. Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος, Καθηγητής, Αγρομετεωρολογία – Δορυφορική Μετεωρολογία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.
3. Κων/νος Κορμάς, Επίκουρος Καθηγητής, Οικολογία Υδάτινης στήλης με έμφαση στα μικροβιακά και τροφικά επίπεδα, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Αειφορική Διαχείριση Υδατικού Περιβάλλοντος» του Τμήματος Γεωπονίας Ζωικής Παραγωγής & Υδάτινου Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το θέμα της μεταπτυχιακής εργασίας είναι «Χωρική Προσομοίωση της ποιότητας των υδάτων της λίμνης Καστοριάς».

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου διατριβής, Λέκτορα κ. Ψιλοβίκο Άρη, καθώς και τα λοιπά μέλη της τριμελούς επιτροπής, Καθηγητή κ. Δαλέζιο Νικόλαο και Επίκουρο Καθηγητή κ. Κορμά Κων/νο για την καλή διάθεση, το χρόνο που διέθεσαν και την πολύτιμη βοήθεια που προσέφεραν στην συγγραφή της συγκεκριμένης εργασίας.

Θερμά ευχαριστώ τον κ. Άδωνι Κοντό της εταιρίας Marathon Data Systems για την παραχώρηση εξάμηνης άδειας του προγράμματος Arcmap 9.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους προϊστάμενους της υπηρεσίας μου, οι οποίοι με διευκόλυναν για την παρακολούθηση και ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού προγράμματος, την κα Σταυρούλα Νικολοπούλου βιολόγο, για την συνεργασία της στις αναλύσεις νερού που πραγματοποίησα, αλλά και τον φίλο μου κ. Λάμπρο Καφίδα για την καθοδήγησή του στην δημιουργία βάσης δεδομένων και στην εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών Arcmap 9.

Τέλος οι θερμές ευχαριστίες μου αποτείνονται στην συμφοιτήτριά μου Άννα Μπλάντα για την υποστήριξη της, στην οικογένεια μου αλλά και σε όσους δεν αναφέρονται επωνύμως, η βοήθεια των οποίων ήταν καταλυτική για την διεκπεραίωση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λίμνη της Καστοριάς είναι μια ρηχή λίμνη, η οποία βρίσκεται στην Δυτική Μακεδονία. Τις τελευταίες δεκαετίες αποτελούσε τον τελικό αποδέκτη των αστικών λυμάτων τόσο της πόλης της Καστοριάς όσο και των άλλων οικισμών όπου βρίσκονται γύρω από αυτή. Εκτός από τα αστικά λύματα αποτελεί τον τελικό αποδέκτη πλήθος ανθρωπογενών δραστηριοτήτων όπως η γεωργία, η κτηνοτροφία, κ.α. Η είσοδος ρυπογόνων ουσιών είχε αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού και την εκδήλωση του φαινομένου του ευτροφισμού. Κατά την διάρκεια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε η εποχιακή παρακολούθηση των πιο αντιπροσωπευτικών φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού σε επιλεγμένα σημεία δειγματοληψίας. Με την εισαγωγή των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και την ανάλυση τους προκύπτουν μια σειρά συμπερασμάτων που αφορούν τις συγκεντρώσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων, την εποχιακή και χωρική διακύμανσή τους. Για την προστασία της λίμνης και την διατήρηση των βασικών χρήσεων που είναι η αλιεία και η άρδευση απαιτείται η ταυτοποίηση της οικολογικής κατάστασης της, ο προσδιορισμός των πηγών ρύπανσης και ο καθορισμός ποιοτικών στόχων τόσο για τις φυσικοχημικές παραμέτρους όσο και για τις βιολογικές. Η στρατηγική διαχείρισής της απαιτεί την μείωση του εξωτερικού οργανικού φορτίου, του ελέγχου της μη σημειακής ρύπανσης από τις γύρω γεωργικές εκτάσεις και την εφαρμογή τεχνικών μείωσης του ευτροφισμού.

Λέξεις κλειδιά: Λίμνη Καστοριάς, ευτροφισμός, ποιότητα νερού, παρακολούθηση, μοντέλο προσομοίωσης, διαχείριση.

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1	Οικουδρολογία λιμνών – Γενικά	16
1.2	Φυσικές παράμετροι των λιμναίων οικοσυστημάτων	19
1.2.1	Φως	19
1.2.2	Χρώμα	21
1.2.3	Θερμοκρασία	21
1.2.3.1	Εποχική στρωμάτωση	23
1.3	Χημικές παράμετροι των λιμναίων οικοσυστημάτων	26
1.3.1	Άνθρακας	26
1.3.2	Άζωτο	28
1.3.3	Φώσφορο	31
1.3.4	Οξυγόνο	37
1.3.4.1	Παράγοντες που επιδρούν στην συγκέντρωση του οξυγόνου	37
1.3.4.2	Χωρικά και εποχικά μοντέλα στη διαθεσιμότητα του οξυγόνου	38
1.3.4.3	Οξυγόνο κορεσμού	40
1.3.5	Μικροθρεπτικά	42
1.3.6	Άλλα θρεπτικά	42
1.3.7	Ηλεκτρική αγωγιμότητα	43
1.3.8	pH	43
1.3.9	Τοξικές ουσίες	44
1.4	Ευτροφισμός	44
2.	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	47
2.1	Παρακολούθηση (monitoring) των λιμνών	47
2.1.1	Γενικά για την παρακολούθηση	47

2.1.2	Παρακολούθηση λιμνών με συστηματική δειγματοληψία	48
2.1.3	Επίγεια τηλεμετρική αυτοματοποίηση παρακολούθηση	50
2.1.3.1	Πολυκάναλος αισθητήρας	54
2.1.3.2	Επίγεια μονάδα ελέγχου	56
2.1.3.3	Λογισμικό αισθητήρων	56
2.1.3.4	Λογισμικό H/Y	56
2.1.3.5	Εγκατάσταση	57
2.1.4	Νεώτερες τεχνικές on –line μέτρησης	58
2.1.4.1	Εισαγωγή	58
2.1.4.2	Οργανικό φορτίο	59
2.1.4.3	Τοξικότητα	59
2.1.5	Δορυφορική παρακολούθηση με χρήση τηλεπισκόπησης	60
2.1.5.1	Εισαγωγή	60
2.1.5.2	Αρχές του συστήματος διαστημικής τηλεπισκόπησης	60
2.1.5.2.1	Συστατικά τα οποία ενεργούν οπτικά	61
2.1.5.2.2	Αισθητήρες τηλεπισκόπησης	61
2.1.5.3	Λιμνολογικές και τοπικές μετρήσεις	62
2.1.5.3.1	Δειγματοληψία	62
2.1.5.3.2	Η υλοποίηση του προγράμματος τηλεπισκόπησης στη λίμνη	62
2.1.6	Παρακολούθηση σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60	64
2.1.6.1	Μηχανισμοί και συχνότητα παρακολούθησης	67
2.1.6.2	Συχνότητα δειγματοληψίας και συνθήκες αναφοράς	69
2.1.6.3	Ταξινόμηση λιμναίων συστημάτων σε κατηγορίες ποιότητας	72
2.1.7	Τύποι ταξινόμησης της οικολογικής κατάστασης των λιμνών	73
2.1.8	Ελληνική Νομοθεσία για την ποιότητα των επιφανειακών υδάτων	76

2.2	Προσομοίωση λιμνών	80
2.2.1	Εισαγωγή	80
2.2.2	Ο μηχανισμός εξέλιξης του χρόνου	83
2.2.3	Τα βήματα μιας μελέτης με προσομοίωση	85
2.2.4	Η δομή των μοντέλων ποιότητας νερού	88
2.2.5	Περιγραφή των εσωτερικών φυσικών χημικών και βιολογικών διεργασιών στα λιμναία οικοσυστήματα	90
2.2.6	Εφαρμογή των μοντέλων ποιότητας νερού	93
2.2.7	Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου	94
2.3	Μοντέλα χωρικής προσομοίωσης με την χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων πληροφοριών	99
2.3.1	Εισαγωγή	99
2.3.2	Δημιουργία χαρτών	103
2.3.3	Το ARCGIS 9	106
2.3.3.1	Επιφάνειας ερμηνείας	107
2.3.4	Μέθοδοι παρεμβολής	108
2.3.5	Διαθέσιμες επιλογές παρεμβολής	110
2.3.6	Αιτιοκρατικές μέθοδοι παρεμβολής	110
2.3.6.1	Μέθοδος IDW	110
2.3.6.2	Μέθοδος σπληνών	111
2.3.6.3	Μέθοδος Δεικτών	111
2.3.6.4	Μέθοδος γειτνίασης	112
2.3.7	Γεωστατιστικές μέθοδοι παρεμβολής	112
2.3.7.1	Μέθοδος Kriging	112
2.3.7.2	Μέθοδος τάσης	113

2.4	Μοντέλα χρονικής προσομοίωσης των μεταβολών της ποιότητας του νερού	113
2.4.1	Εισαγωγή	113
2.4.2	Στοχαστικά μοντέλα	114
2.4.3	Έλεγχος τάσεων	116
2.5	Η περιοχή έρευνας της λίμνης Καστοριάς	119
2.5.1	Γεωγραφικά στοιχεία	119
2.5.2	Υδρογεωμορφολογικά	120
2.5.3	Γεωλογικά στοιχεία	125
2.5.4	Υδρογεωλογικά στοιχεία	128
2.5.5	Κλιματικά στοιχεία	130
2.5.6	Στοιχεία υδρολογίας επιφανειακού – υπογείου υδατικού Ισοζυγίου	132
2.5.7	Λιμνολογικά χαρακτηριστικά	135
2.5.8	Χρήση του νερού της λίμνης	136
2.5.9	Νομοθετικές ρυθμίσεις	138
2.5.10	Συνοπτική περιγραφή των υφιστάμενων πηγών ρύπανσης	139
2.5.10.1	Αξιολόγηση των επιβαρύνσεων	141
2.5.10.2	Πηγές ρύπανσης	142
2.6	Μετρήσεις πεδίου και μέθοδοι δειγματοληψίας	146
2.6.1	Σημεία και συχνότητα δειγματοληψίας	146
2.6.2	Διαδικασία δειγματοληψίας	147
2.6.3	Ποσοτικός προσδιορισμός των παραμέτρων	148

3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	150
3.1	Γραφήματα των παραμέτρων	150
3.2	Δισδιάστατα διαγράμματα χωρικής προσομοίωσης	164
3.3	Έλεγχος χρονικής μεταβολής-τάσεων	225
4	ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	227
5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	244
6	ABSTRACT	253
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	254

1 Εισαγωγή

Η σημασία των επιφανειακών νερών είναι αναμφισβήτητη. Ιστορικά όλοι οι μεγάλοι οικισμοί, οι καλλιέργειες και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, δημιουργήθηκαν δίπλα σε ποτάμια και λίμνες. Οι λίμνες έχουν υποστεί υποβάθμιση της οικολογικής τους κατάστασης εξαιτίας της ανεξέλεγκτης ανάπτυξης οικισμών αλλά και των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Για τον λόγο αυτό χρήζουν εφαρμογής μέτρων εξυγίανσης και αναβάθμισης καθώς αποτελούν σημαντικούς οικοτόπους. Η διατήρηση τους επηρεάζει την περαιτέρω οικονομική ανάπτυξη των περιοχών με ποικίλες δραστηριότητες (π.χ. τουρισμό, αλιεία, αναψυχή).

Η λίμνη της Καστοριάς (Ορεστιάδα), η οποία περιτοιχίζει την πόλη της Καστοριάς προσδίδοντας της θαυμάσια φυσικά τοπία, αποτελεί το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Η λίμνη είναι ένα πλούσιο φυσικό οικοσύστημα με μεγάλη βιοποικιλότητα και με ιδιαίτερη σημασία για την πόλη της Καστοριάς καθώς αποτελεί πόλο έλξης επισκεπτών. Επίσης το νερό της λίμνης χρησιμοποιείται για άρδευση των αγροτικών καλλιεργειών που βρίσκονται περιμετρικά της. Ως φυσικός πλούτος παίζει πολύ σπουδαίο ρόλο αναψυχής. Δεν είναι λίγοι οι κάτοικοι που ασχολούνται με την αλιεία κυρίως την ερασιτεχνική. Τέλος στην λίμνη διεξάγονται κωπηλατικοί αγώνες ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η λίμνη δεχόταν σημαντικές πιέσεις από ρυπαντικά φορτία που προέρχονταν από τις οικιακές, βιοτεχνικές, γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Τα φορτία αυτά έχουν μειωθεί σημαντικά εξαιτίας της λειτουργίας του βιολογικού καθαρισμού της πόλης από το 1991.

Η εργασία αυτή έχει τους εξής βασικούς άξονες και στόχους:

- Την περιγραφή της οικοϋδρολογίας των λιμνών

- Την αναγκαιότητα της παρακολούθησης των λιμνών και την μεθοδολογία της παρακολούθησης
- Την εισαγωγή της έννοιας της προσομοίωσης ως εργαλείο ανάλυσης της ποιότητας των λιμναίων οικοσυστημάτων
- Την χρήση του GIS ως μέσου ανάλυσης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων
- Τη διερεύνηση όλων των στοιχείων φυσικού περιβάλλοντος της λίμνης της Καστοριάς (Γεωγραφικά, Υδρογεωμορφολογικά, Γεωλογικά, Υδρολογικά, Μορφομετρικά και Λιμνολογικά)
- Την εισαγωγή όλων των χωρικών στοιχείων που προκύπτουν από τα ποιοτικά δεδομένα της λίμνης και για τις συγκεκριμένες θέσεις μέτρησης και σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους-εποχές του έτους και τη δημιουργία ισοποσοτικών καμπυλών για όλες αυτές τις ποιοτικές παραμέτρους.
- Τη σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων
- Την εξαγωγή συμπερασμάτων για την οικολογική κατάσταση της λίμνης
- Την υποβολή προτάσεων για την λήψη μέτρων βελτίωσης της υφιστάμενης κατάστασης.

Στο παρελθόν έχουν εκπονηθεί αρκετές μελέτες που σχετίζονται με την λίμνη Καστοριάς και οι οποίες οδήγησαν σε πολύ σημαντικά συμπεράσματα για την κατάσταση της λίμνης, καθώς και για τα μέτρα που θα έπρεπε κάθε φορά να ληφθούν για την βελτίωση αυτής της κατάστασης της. Παρακάτω γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μελετών οι οποίες χορηγήθηκαν από τους φορείς Καστοριάς (Δήμος, Νομαρχία) και χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Ο Βαφειάδης (1983) στη διδακτορική του διατριβή με θέμα την «Υδρογεωλογική μελέτη της λεκάνης Καστοριάς», επικεντρώνεται στα εξής:

- 1) Προσδιορισμός των υδρολογικών στοιχείων της λεκάνης απορροής της λίμνης Ορεστιάδας,
- 2) Καθαρισμός των ισουέτιων καμπυλών από τα βροχομετρικά δεδομένα των ετών 1968-1980
- 3) Προσδιορισμός του υπόγειου υδροκρίτη των καρστικών υδροφορέων της ασβεστολιθικής αυτής περιοχής,
- 4) Προσδιορισμός του μέσου συντελεστή κατείσδυσης
- 5) Υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας από δοκιμαστικές αντλήσεις γεωτρήσεων και
- 6) Εύρεση του Υδατικού Ισοζυγίου

Με προγραμματική σύμβαση που υπογράφηκε στις 3 Αυγούστου 1992, ο Δήμος Καστοριάς ανάθεσε στο Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (Δ.Π.Θ) από κοινού με το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ) την εκπόνηση ερευνητικού έργου με τίτλο «Μελέτη για Εξυγίανση και Αξιοποίηση της Λίμνης Καστοριάς» (Οικονομόπουλος, 1994). Από οργανωτικής άποψης η μελέτη έχει χωριστεί σε οχτώ επιμέρους επιστημονικές θεματικές ενότητες, για κάθε μια από τις οποίες έχει οριστεί υπεύθυνος ερευνητής με εκτενές σχετικό ερευνητικό και μελετητικό έργο.

Η Τρίτη θεματική ενότητα, η οποία έχει εκπονηθεί από τον Α.Κοβάτση, Καθ. Α.Π.Θ, έχει τον τίτλο «Μέτρηση τοξικών ενώσεων και διαχείριση αυτών στη λίμνη της Καστοριάς». Οι προβλεπόμενες για τη παρούσα θεματική ενότητα δραστηριότητες αφορούν την έρευνα σε τοξικές ουσίες που υπήρχαν τόσο στα νερά όσο και στον πυθμένα της λίμνης και ιδιαίτερα στις βασικές κατηγορίες τοξικών ουσιών όπως, φυτοφάρμακα διαφόρων κατηγοριών (οργανοφωσφορικά, διθεικαρβαμιδικά κτλ.),

διάφορα βαρέα μέταλλα (μόλυβδος, κάδμιο κτλ.) και την διαχείριση τους. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το έτος 1993.

Η πρώτη θεματική ενότητα έχει εκπονηθεί από την Τρισεύγενη Γιαννακοπούλου, Επ. Καθηγήτρια Δ.Π.Θ., και έχει τον τίτλο «Μελέτη ευτροφισμού και ποιότητας νερού». Η μελέτη του ευτροφισμού και της ποιότητας του νερού αποτελεί κυρίως παρακολούθηση βασικών παραμέτρων του νερού οι οποίες σχετίζονται με τον ευτροφισμό με στόχο την απογραφή και εκτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης της λίμνης με την βοήθεια ποικίλων δεικτών ευτροφισμού σε σχέση με εναλλακτικές πρακτικές διαχείρισης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τον Δεκέμβριο του 1992 έως τον Αύγουστο του 1993.

Στην έκτη θεματική ενότητα με τίτλο «Μελέτη προστασίας ορνιθοπανίδας και διαχείρισης περιφερειακής ζώνης καλαμώνων, υπεύθυνος ήταν ο κος Περγαντής Φώτης, Βιολόγος. Η μελέτη οδήγησε σε σημαντικά συμπεράσματα σε σχέση με τις διαχειριστικές ανάγκες της λίμνης.

Στην έβδομη θεματική ενότητα υπεύθυνος ήταν ο Λουκάκης Παύλος, Καθηγητής Α.Π.Θ και ο τίτλος της είναι «Μελέτη οικιστικής και κοινωνικής ανάπτυξης και χωρικής αναδιάρθρωσης». Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει τη μελέτη χωροταξικής διάθρωσης και ανάπτυξης της περιοχής που ορίζεται από τη λίμνη της Καστοριάς και την περιβάλλουσα χερσαία ζώνη αυτής με παράλληλη προστασία, έλεγχο και ανάδειξη των φυσικών ιδιοτεροτήτων των λιμναίων οικοσυστημάτων.

Στην όγδοη θεματική ενότητα, με τίτλο «Εφαρμογή μοντέλου ποιότητας και διαχείρισης πηγών ρύπανσης» υπεύθυνος ήταν ο Π. Οικονομόπουλος, Αν. Καθηγητής Δ.Π.Θ. Το συγκεκριμένο τμήμα της μελέτης καλύπτει το θέμα της ρύπανσης της λίμνης και της διαμόρφωσης αποδοτικών μέτρων ελέγχου. Τα μαθηματικά μοντέλα που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της παρούσας θεματικής ενότητας κατέδειξαν ότι η

λίμνη είναι υπερευτροφική και μάλιστα με δείκτες ακραίους σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Το Σεπτέμβριο του 1997 η λίμνη Ορεστιάδα μελετήθηκε από την Αναπτυξιακή Καστοριάς στο «Πρόγραμμα αντιμετώπισης περιβαλλοντικών προβλημάτων-Οριοθέτηση του υδροβιότοπου λίμνης Καστοριάς και ευρύτερης περιοχής του » και η οποία οδήγησε σε πολύ σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την κατάσταση των οικοσυστημάτων στην περιοχή.

Το 1999, ο Δήμος Καστοριάς χρηματοδότησε και ανέθεσε ένα ερευνητικό πρόγραμμα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης και συγκεκριμένα στην τότε Επίκουρο Καθηγήτρια του Τμήματος Βιολογίας κ. Μουστάκα-Γούνη Μαρία με τίτλο «Διερεύνηση υδροβιολογικών παραμέτρων στη λίμνη Καστοριάς-Επιλογή βέλτιστης μεθόδου αποκατάστασης της οικολογικής ισορροπίας». Από την παραπάνω μελέτη προέκυψαν πολύ σημαντικά συμπεράσματα-αποτελέσματα από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν από τον Οκτώβριο του 1998 έως τον Απρίλιο του 1999 αναφορικά με την ποιοτική κατάσταση και τις μεταβολές σε όλη τη στήλη του νερού της λίμνης σε διάφορες καθορισμένες θέσεις δειγματοληψίας.

Το 2002 μελετήθηκε η λίμνη της Καστοριάς στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «Έλεγχος Ποιότητας Επιφανειακών Υδάτων στη Μακεδονία-Θράκη». Φορέας χρηματοδότησης ήταν το Υπουργείο Γεωργίας. Επιστημονικώς υπεύθυνη ήταν η Μουρκίδου-Παπαδοπούλου Ευθυμία. Η μελέτη βασίστηκε σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν το έτος 1999-2000. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω μελέτη είναι ότι η ποιότητα του νερού της λίμνης αυτής ήταν καλή σε σύγκριση με την κατάστασή της κατά την προηγούμενη δεκαετία και ότι τα νερά της λίμνης της Καστοριάς δεν είχαν υψηλό οργανικό φορτίο ρύπων.

Όλες οι παραπάνω μελέτες – έρευνες χρησιμοποιήθηκαν για την υποστήριξη αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.

1.1 Οικουδρολογία λιμνών

Το νερό είναι το θεμελιώδες συστατικό της ζωής και είναι σημαντικό για μια σειρά οικονομικών ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Επίσης είναι μια πηγή περιορισμένη όπως συχνά διαπιστώνεται από τις τραγικές επιπτώσεις της ξηρασίας σε αρκετές περιοχές του πλανήτη μας. Ακόμα και σε περιοχές πλούσιες σε κατακρημνίσματα, και σε μεγάλες υδρολογικές λεκάνες ποταμών, η υπερκατανάλωση και η έλλειψη διαχείρισης του νερού δημιούργησε μεγάλους περιορισμούς στην διαθεσιμότητα του νερού.

Οι μετρήσεις ποιότητας του νερού είναι βασικές για να περιγραφεί η συγκρισιμότητα των δεδομένων που αποκτούνται παγκοσμίως και αποτελούν την βάση για σωστές αποφάσεις σε σχέση με την διαχείριση των υδάτινων πόρων, αντικείμενα παρακολούθησης, βιολογική ποιότητα κλπ.

Ο σκοπός της εργασίας είναι να επιχειρηθεί η προσομοίωση ενός λιμναίου οικοσυστήματος με σκοπό την ευαισθητοποίηση όλων όσων είναι υπεύθυνοι για την διαχείριση έτσι ώστε να κινηθούν από την μεμονωμένη σταδιακή προσέγγιση σε μια πιο ολοκληρωμένη και πιο ουσιαστική προσέγγιση τόσο ευαίσθητων περιβαλλοντικών θεμάτων.

Τα εσωτερικά νερά καλύπτουν ένα μικρό μόνο μέρος της επιφάνειας της γης. Ωστόσο η σημαντικότητα τους καθώς αποτελούν πηγή για το πόσιμο νερό, την άρδευση, την αλιεία, την ιχθυοκαλλιέργεια και τον τουρισμό είναι αναμφισβήτητη. Η διαχείριση των υδατικών πόρων η επιστήμη που μελετά τα εσωτερικά νερά , αποτελεί την αναγκαία επιστημονική βάση για την διαχείριση των λιμναίων και ποτάμιων συστημάτων. Ιδιαίτερα οι λίμνες μπορούν να περιγραφούν ως ο τόπος όπου συντελούνται πλήθος οικολογικές αλληλεπιδράσεις, μεταξύ του έμβιου και του

αβιοτικού περιβάλλοντος. Στις λίμνες η μελέτη όλων αυτών των αλληλεπιδράσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί εφόσον συντελεστούν οι κατάλληλες δειγματοληψίες.

Η λίμνη αποτελεί ένα ξεχωριστό οικοσύστημα, αρκετά πολύπλοκο και μπορεί να ανταποκριθεί διαφορετικά με γνώμονα την ποιότητα του νερού. Γενικά η οικολογική κατάσταση ενός τέτοιου συστήματος επιδεικνύει διαφορετική ελαστικότητα στις πιέσεις των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Στα λιμναία οικοσυστήματα λαμβάνοντας υπόψη τα υδρολογικά και λιμνολογικά στοιχεία, θα μπορούσαν να περιγραφούν και να μελετηθούν ως μεμονωμένα:

- η λεκάνη απορροής
- οι δυναμικές διεργασίες που αναπτύσσονται στο οικοσύστημα
- οι παράγοντες εξωτερικών πιέσεων
- η διαχειριστική δράση
- η συλλογή των δεδομένων των διεργασιών αποτίμησης.

Κάθε μια από τις παραπάνω περιοχές μελέτης έχει την δική της πολυπλοκότητα και επιπρόσθετα μεταξύ τους υπόκεινται σε αλληλεπιδράσεις.

Λαμβάνοντας υπόψη την οικολογία του αποδέκτη οι ακόλουθες αλληλεπιδράσεις είναι οι σημαντικότερες (Dillon and Rigler, 1975):

- στήλη νερού με το ίζημα
- η ανάπτυξη της μικρο/μακρο χλωρίδας και πανίδας και η σχέση τους με την τροφική αλυσίδα αλλά και με φυσικούς και χημικούς προσδιοριστικούς παράγοντες
- η δυναμική μεταφορά ενέργειας στην υδάτινη μάζα κ.ά

Η πολυπλοκότητα των επιμέρους διεργασιών μπορεί να συνδεθεί με τις ακόλουθες έννοιες : το υδάτινο ισοζύγιο (συμπεριλαμβανομένης της συνεισφοράς των υπόγειων νερών), τις δυναμικές ανάμειξης του νερού και των διαλυμένων

συστατικών σε αυτό, τις φυσικές και χημικές διεργασίες οι οποίες ρυθμίζουν την εναπόθεση και την απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών από την χλωρίδα και την πανίδα του συστήματος.

Χαρακτηριστικό των λιμνών και των σχηματισμών του γλυκού νερού γενικότερα είναι οι μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κατά την διάρκεια του έτους. Συγκριτικά με τους θαλάσσιους σχηματισμούς, η προσβολή τους από ρύπους και από πηγές μόλυνσης είναι μεγαλύτερη καθώς και η αυξομείωση της στάθμης τους λόγω πλήρωσης τους στην διάρκεια των βροχερών μηνών και λόγω εξάτμισης σε περιόδους ξηρασίας (Κοβάτσης, 1993).

Τα οικοσυστήματα των λιμνών παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές οι οποίες σχετίζονται με το βάθος τους, την ποιότητα των νερών τους, τη γεωγραφική τους θέση, τον τρόπο σχηματισμού τους (τεκτονικές, ηφαιστειογενείς, καρστικές κ.α), την γεωμορφολογία της λεκάνης απορροής τους και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες της περιοχής.

Η κάθε λίμνη αποτελεί ένα υδατικό οικοσύστημα όπου αναπτύσσονται πλήθος βιοκοινότητες σύμφωνα τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά που επικρατούν και αποτελούν τους αβιοτικούς παράγοντες.

Ανάμεσα στους κύριους παράγοντες που διαμορφώνουν τη ζωή στις λίμνες, όπως και σε κάθε άλλο υδατικό οικοσύστημα, είναι η διαθεσιμότητα του φωτός στα διάφορα υδάτινα στρώματα, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών στο νερό. Κάθε μεταβολή των φυσικών και χημικών παραγόντων έχει σημαντικές επιπτώσεις στους ίδιους τους οργανισμούς.

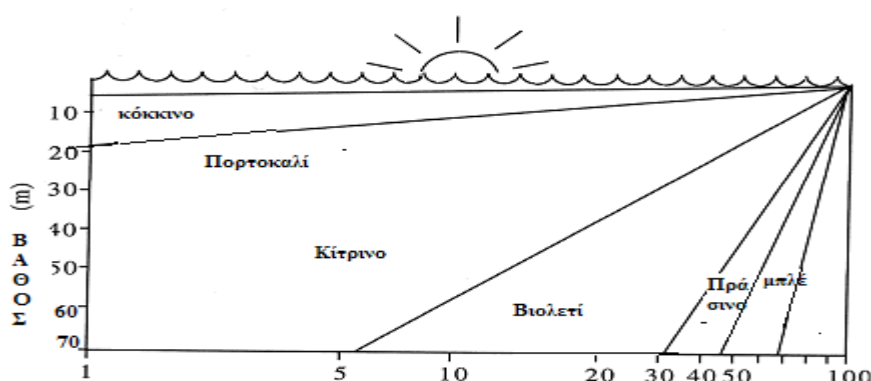
1.2 Φυσικές παράμετροι των λιμνών

1.2.1 Φως

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί την μεγαλύτερη εισροή ενέργειας στις λίμνες. Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας είναι δυνατόν να μετατραπεί σε δυναμική ενέργεια διαμέσου των βιοχημικών διεργασιών όπως η φωτοσύνθεση.

Η ηλιακή ενέργεια που δέχεται η υδάτινη επιφάνεια είναι συνάρτηση του ύψους στο οποίο βρίσκεται ο ήλιος και της γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων. Συνεπώς επηρεάζεται σημαντικά από το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή. Η διάρκεια της ημέρας είναι ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την ηλιακή ροή που φθάνει στην επιφάνεια της λίμνης.

Η απορρόφηση του φωτός από το νερό είναι υψηλή στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος ($>750\text{nm}$), ελαττώνεται στο ορατό τμήμα ($750\text{-}350\text{ nm}$) και ξανά αυξάνει στην περιοχή της υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας $< 350\text{ nm}$. Στο καθαρό νερό, όλη η ερυθρά ακτινοβολία απορροφάται στα πρώτα λίγα μέτρα, ενώ σχεδόν το 70% της μπλε ακτινοβολίας παραμένει έως και στο βάθος των 70 m (Εικόνα 1).



Το ποσοστό επιφανειακού φωτός (% κλίμακα log)

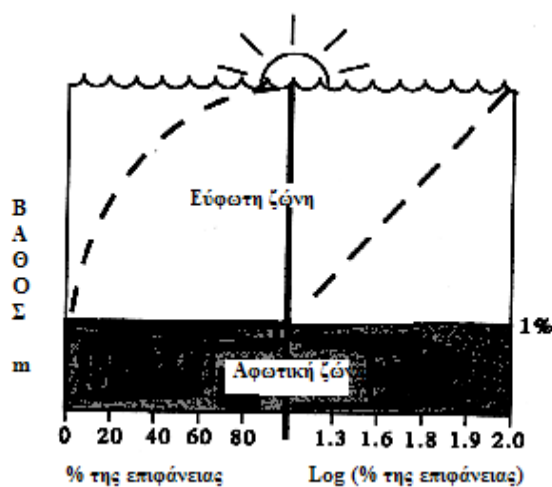
Εικόνα 1 Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από το νερό

Γενικά περισσότερο από το 50% της ολικής ηλιακής ενέργειας απορροφάται στα πρώτα μέτρα της υδάτινης στήλης. Το βάθος στο οποίο μπορεί να εισχωρήσει το

φως εξαρτάται από το ποσό των διαλυμένων συστατικών και των αιωρούμενων συστατικών. Συγκριτικά η υπεριώδης ακτινοβολία (UV) εισχωρεί σε μεγαλύτερα βάθη στα θαλάσσια οικοσυστήματα από ότι στα οικοσυστήματα των εσωτερικών υδάτων με την ίδια περιεκτικότητα σε διαλυμένο οργανικό υλικό (Arts et al., 2000).

Εάν τα ποσοστά του φωτός που παραμένουν διαδοχικά σε διάφορα βάθη, παρουσιαστούν σχηματικά, προκύπτει εκθετική καμπύλη, αλλά αν η ένταση του φωτός παρουσιαστεί σε λογαριθμική κλίμακα, η ελάττωση της ηλιακής έντασης με το βάθος περιγράφεται με γραμμική συνάρτηση (Εικόνα 2). Ο κύριος λόγος μετατροπής της έντασης του φωτός σε λογαριθμική κλίμακα είναι η απλοποίηση του καθορισμού του βάθους όπου το 1% του επιφανειακού φωτός παραμένει. Το επίπεδο του 1% είναι απλά η διακοπή της γραμμικής συνάρτησης το οποίο είναι σημαντικό από την στιγμή που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του μέγιστου βάθους όπου συντελείται η φωτοσύνθεση.

Το τμήμα της υδάτινης στήλης όπου παράγεται οξυγόνο από τους πρωτογενείς οργανισμούς ονομάζεται εύρωτη ζώνη και η περιοχή κάτω από αυτή αφωτική. Το όριο μεταξύ αυτών των δυο ζωνών είναι εκείνο όπου η φωτοσύνθεση αντισταθμίζεται με την αναπνοή (Εικόνα2).



Εικόνα 2. Η ελάττωση του φωτός διαμέσου της υδάτινης στήλης

1.2.2 Χρώμα

Το χρώμα του νερού σε μια λίμνη είναι το χρώμα του φωτός που διαχέεται προς τα πάνω, αφού πρώτα έχει εισχωρήσει στο νερό και έχει χάσει μέρος από εκείνα τα μήκη κύματος που απορροφούνται πιο εύκολα. Ο κύριος προσδιοριστικός παράγοντας του χρώματος είναι το διαλυμένο οργανικό υλικό.

Το χρώμα σε μια λίμνη κυμαίνεται από το γαλάζιο του καθαρού νερού, το γαλαζοπράσινο, το πράσινο, το πρασινοκίτρινο και το πρασινοκαφέ. Το καφέ χρώμα παρατηρείται κυρίως σε λίμνες που περιέχουν μεγάλες ποσότητες ανόργανων υλικών, τα οποία μεταφέρθηκαν από ποτάμια ή από τον έντονο κυματισμό των νερών των λιμνών (Σίνης,2005).

Συνήθως το φως που διαχέεται κυριαρχεί στο πράσινο τμήμα του φάσματος, ενώ η αύξηση των συγκεντρώσεων του οργανικού υλικού προκαλεί την μεταβολή της κυριαρχίας εκπομπής στο κίτρινο τμήμα του φάσματος (Wetzel,2001).

Το ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$), το οποίο συναντάται σε λίμνες με υψηλή σκληρότητα νερού, διαχέει το φως στο πράσινο και μπλε τμήμα του φάσματος προσδίδοντας στο νερό ένα χαρακτηριστικό πράσινο-μπλε χρώμα.

1.2.3 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι ένας από τους κυριότερους αβιοτικούς παράγοντες και επιδρά σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής. Η κύρια διαφορά μεταξύ του νερού και άλλων μέσων είναι η υψηλή ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας. Οι ημερήσιες και εποχικές διαφορές θερμοκρασίας είναι κατά συνέπεια λιγότερο δραστικές στους λιμναίους οργανισμούς σε σχέση με τους οργανισμούς που διαβιούν στην ξηρά. Εκτός των οριζόντιων διαφορών θερμοκρασίας σημαντικές είναι οι κατακόρυφες μεταβολές της θερμοκρασίας. Έτσι η θερμοκρασία καθορίζει τη μεταβολική διαδικασία σε σημαντικό βαθμό.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι μεταβολές της θερμοκρασίας καθορίζουν την έναρξη μερικών διαδικασιών, όπως αναπαραγωγή, ανάπτυξη, μετακίνηση, μετανάστευση κ.α των οργανισμών. Επίσης επιδρά στην διαλυτότητα του οξυγόνου και των υπόλοιπων ουσιών που περιέχονται στο νερό. Για κάθε υδρόβιο πληθυσμό υπάρχει ένα βέλτιστο εύρος θερμοκρασιών.

Διαφορές στο θερμοκρασιακό καθεστώς μιας λίμνης δημιουργούν ζωνώσεις (θερμική στρωμάτωση λίμνης). Σε μια τυπική λίμνη διακρίνονται κυρίως οι τρεις παρακάτω ζώνες :

Επιλίμνιο : πρόκειται για το επιφανειακό νερό, το οποίο δέχεται την άμεση επίδραση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και περιέχει την μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου. Το νερό στο επιλίμνιο είναι θερμότερο από εκείνο των άλλων υποκείμενων στρωμάτων κατά τις θερμές περιόδους. Ωστόσο κατά την χειμερινή περίοδο και όταν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας πλησιάζει το μηδέν, το επιλίμνιο μπορεί να είναι ψυχρότερο από τα υποκείμενα στρώματα, των οποίων η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στους 4 °C. Κάτω από τους 4 °C η πυκνότητα του νερού μειώνεται με αποτέλεσμα οι μεγάλοι όγκοι νερού να μην παγώνουν ολοσχερώς όταν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι ίση με το μηδέν ή μικρότερη, αλλά μόνο επιφανειακά. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει την διατήρηση της ζωής στις λίμνες που παγώνουν επιφανειακά κατά τους χειμερινούς μήνες.

Θερμοκλινές (μεταλίμνιο): πρόκειται για ένα λεπτό στρώμα νερού με έντονη θερμική διαβάθμιση κατά την οποία η θερμοκρασία ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση του βάθους. Το θερμοκλινές εμποδίζει την μεταφορά των θρεπτικών συστατικών και του οξυγόνου από το επιλίμνιο στο κατώτερο θερμικό στρώμα το υπολίμνιο.

Υπολίμνιο : πρόκειται για το κατώτερο, βαρύτερο και συχνά ψυχρότερο στρώμα της λίμνης.

1.2.3.1 Εποχική στρωμάτωση

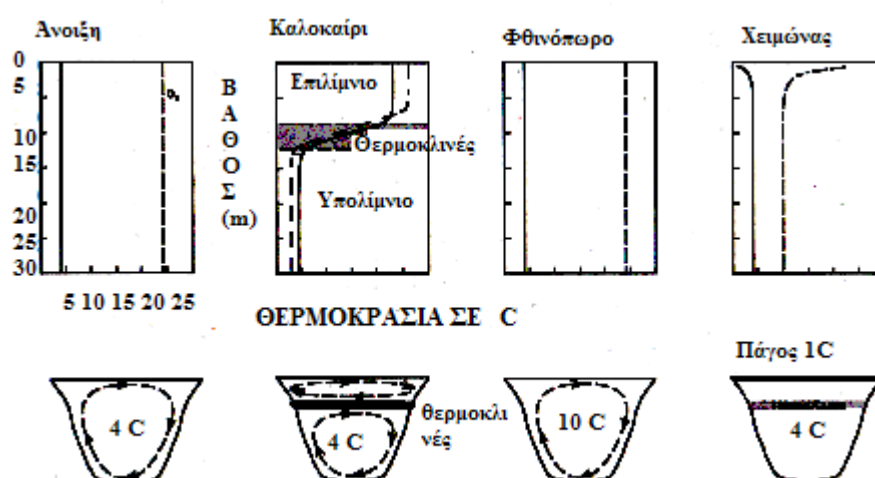
Κατά την διάρκεια του χειμώνα όταν η θερμοκρασία της λίμνης ψυχραίνει κάτω από τους 4 °C και η πυκνότητα του νερού είναι μέγιστη, μια στρωμάτωση επιτυγχάνεται καθώς το ανώτερο στρώμα αποκτά την χαμηλότερη θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει καθώς η πυκνότητα του νερού μειώνεται σε θερμοκρασίες κάτω των 4°C με αποτέλεσμα το στρώμα του ψυχρού λιγότερου πυκνού νερού να βρίσκεται πάνω από το πυκνότερο νερό των 4°C. Βέβαια οι διαφορές πυκνότητας ανάμεσα σε αυτά τα δυο στρώματα είναι ασήμαντες και έτσι μπορεί εύκολα να διαλυθεί η στρωμάτωση με την δράση ανέμου και την διατάραξη του νερού. Αυτό το μοντέλο μπορεί να συνεχιστεί έως ότου σχηματιστεί πάγος κατά την διάρκεια ψυχρής νύχτας χωρίς άνεμο ο οποίος αποκλείει την λίμνη από περαιτέρω εισαγωγή ενέργειας διαμέσου δράσης ανέμου (Σίνης, 2005).

Οι ατμοσφαιρικές θερμοκρασίες αυξάνουν την άνοιξη στο Βόρειο ημισφαίριο και στις εύκρατη ζώνη το στρώμα πάγου σταδιακά μειώνεται και τελικά σπάει. Αυτή την στιγμή η θερμοκρασία είναι γύρω στους 4°C. Διαφορά λίγων βαθμών της θερμοκρασίας με το βάθος δεν επηρεάζει ουσιαστικά την πυκνότητα του νερού. Η ομοιομορφία της πυκνότητας σε όλη την υδάτινη μάζα απαιτεί μόνο μια μικρή ποσότητα δράσης ανέμου για να αναμίξει όλη την υδάτινη στήλη. Έτσι η λίμνη χάνει το προστατευτικό κάλυμμα πάγου χωρίς την άνοιξη, και ολόκληρη η υδάτινη μάζα κυκλοφορεί με την δράση του ανέμου.

Το νερό της λίμνης θα κυκλοφορεί για κάποιο χρονικό διάστημα, αλλά καθώς η άνοιξη προχωρά, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει και μαζί της η θερμοκρασία του νερού. Εξαιτίας του γεγονότος ότι το κύριο τμήμα της θερμότητας

απορροφάται στα πρώτα μέτρα της υδάτινης στήλης, το επιφανειακό νερό θερμαίνεται ραγδαία. Κατά την διάρκεια θερμού ήπιου καιρού, το θερμότερο ανώτερο στρώμα αναπτύσσεται. Δεδομένης της εκθετικής μείωσης της πυκνότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας προκύπτει σημαντική διαφορά της πυκνότητας με μόλις λίγων βαθμών διαφορά στην θερμοκρασία μεταξύ του θερμότερου επιφανειακού στρώματος και του ψυχρότερου στρώματος του πυθμένα. Αυτή η διαφορά πυκνότητας μεταξύ των δυο στρωμάτων είναι αρκετή για να αντισταθεί στην ανάμειξη με την συνεχιζόμενη δράση των ανέμων. Έτσι η λίμνη στρωματοποιείται στο ανώτερο θερμό στρώμα, το επιλίμνιο, και το κατώτερο ψυχρό στρώμα, το υπολίμνιο που βρίσκεται κάτω από το επιλίμνιο. Το στρώμα μεταξύ των δυο στρωμάτων όπου υπάρχει έντονη κατακόρυφη πτώση της θερμοκρασίας ονομάζεται θερμοκλινές ή μεταλίμνιο.

Η θερμική στρωμάτωση και η ανταλλαγή εξαρτώνται από την ηλιακή ακτινοβολία και τον άνεμο. Επιπρόσθετα από τον άνεμο, το μέγεθος και η ένταση του ανέμου στην λίμνη και περιστασιακά η εισροή νερού είναι οι κύριοι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν τον τύπο της ανάμιξης. Στην εικόνα 3 που ακολουθεί φαίνεται μια εποχιακή κυκλοφορία του νερού σε μια εύκρατη ζώνη.



Εικόνα 3 Εποχιακή κυκλοφορία του νερού σε μια εύκρατη λίμνη.

Το βάθος του επιλιμνίου και η θερμοκρασία του υπολίμνιου μπορεί να εξαρτηθεί από ένα αριθμό παραγόντων, όπως το γεωγραφικό πλάτος, ο καιρός, η διαύγεια του νερού και η μορφομετρία της λίμνης. Τα χαρακτηριστικά της λίμνης μπορούν να μορφοποιήσουν την δράση του ανέμου και το βάθος του θερμοκλινούς. Η επιφάνεια της λίμνης, το μέσο βάθος, ο όγκος και η μεγαλύτερη απόσταση της λίμνης όπου ο άνεμος μπορεί να δράσει πάνω από τη ξηρά, είναι παράγοντες που επηρεάζουν το πόσο ικανοποιητικά ο άνεμος μπορεί να μεταφέρει την θερμότητα στα κατώτερα στρώματα. Πρόσφατα έχει αποδειχθεί ότι η βιοτική δομή μιας λίμνης μπορεί να επηρεαστεί από το βάθος του επιλιμνίου (Mazumder and Taylor et al., 1994) διαμέσου της υδάτινης διαύγειας.

Το εποχικό μοντέλο της θερμοκρασίας, συμπεριλαμβανομένου και του σχηματισμού του θερμοκλινούς, είναι το πιο σημαντικό φυσικό γεγονός για την δομή και την λειτουργία της λίμνης και μπορεί να επηρεάσει δραματικά τις συνθήκες της βιοτικής μορφής μιας λίμνης. Μετά την στρωμάτωση, η λίμνη διαχωρίζεται σε δυο τμήματα ένα θερμό καλά αναμιγμένο ανώτερο στρώμα με έντονη ένταση φωτός όπου λαμβάνει χώρα το υψηλότερο ποσοστό της πρωτογενούς παραγωγής και ένα κρύο, αδιατάρακτο κατώτερο στρώμα όπου πραγματοποιείται η αποσύνθεση των νεκρών οργανισμών που εισέρχονται από το επιλίμνιο. Εξαιτίας της παρουσίας των νεκρών οργανισμών στο υπολίμνιο και της περιορισμένης ανταλλαγής μεταξύ των δυο στρωμάτων, η διαθεσιμότητα των θρεπτικών σύντομα θα περιορίσει την πρωτογενή παραγωγική διαδικασία στο επιλίμνιο καθώς το αποθεματικό της εξαντλείται.

Οι ημερήσιες αλλαγές στην θερμοκρασία του νερού είναι περισσότερο καταφανείς στους οργανισμούς που διαβιούν στις ρηχές περιοχές, όπως στα υποστρώματα υδρόβιας βλάστησης της παρόχθιας περιοχής .

1.3 Χημικές παράμετροι των λιμνών

1.3.1 Άνθρακας

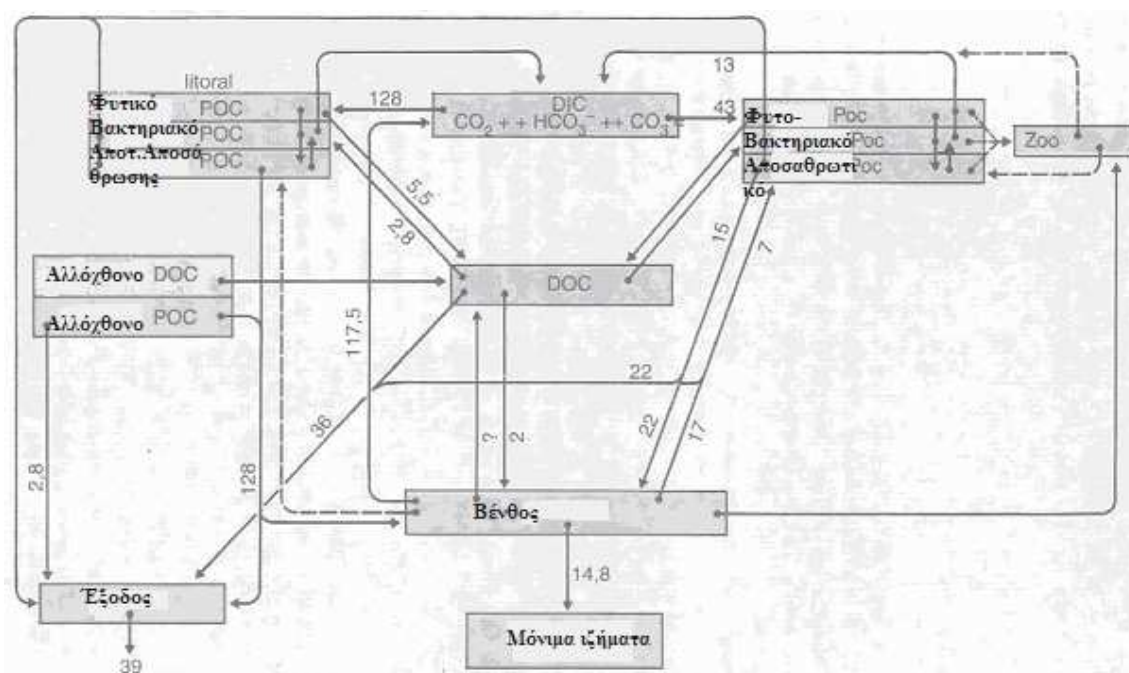
Ο άνθρακας ο οποίος εισέρχεται είτε ως διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα και είτε χρησιμοποιείται από τους οργανισμούς οι οποίοι φωτοσυνθέτουν (αυτόχθονος άνθρακας), ή από αποικοδόμηση των χερσαίων οργανισμών (αλλόχθονος άνθρακας). Σε υψηλής παραγωγικότητας λίμνες, όπου ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης είναι υψηλός, η μεγαλύτερη αναλογία του άνθρακα είναι αυτόχθονη, ενώ η αλλόχθονη αναλογία είναι υψηλή στις οργανικές λίμνες. Πράγματι, μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους τυπολογίας λιμνών βασίζεται στο πού παράγεται ο άνθρακας και σε ποιες ποσότητες.

Ο άνθρακας μπορεί να δεσμευτεί στους ζώντες αλλά και στους νεκρούς οργανισμούς ή μπορεί να διαλυθεί στο νερό ως διαλυμένος οργανικός άνθρακας. Ο ολικός διαλυμένος άνθρακας που απαντάται σε μια λίμνη είναι πολύ μεγάλος. Με δεδομένο αυτό, διαπιστώνεται ότι το 90% δεν είναι εύκολα διαθέσιμο στους οργανισμούς και μόλις το 10% είναι άμεσα διαθέσιμο στα βακτήρια. Πρόσφατα το ποσοστό του διαλυμένου οργανικού άνθρακα έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει σαν αποτέλεσμα της φωτοχημικής αποσύνθεσης (Lindell et al., 1995). Έτσι η φωτεινή ενέργεια διασπά τα μεγάλα μόρια άνθρακα ακόμη και τα οργανικά σε μικρότερα μόρια τα οποία μπορούν ευκολότερα να αποικοδομηθούν από τα βακτήρια και τα πρωτόζωα.

Το υπεριώδες φως είναι ιδιαίτερα σημαντικό για αυτή την αποικοδόμηση. Καθώς ο κύκλος του άνθρακα είναι βασικός για τον μεταβολισμό ολόκληρης της λίμνης, τα αποτελέσματα της παγκόσμιας αύξησης της υπεριώδους ακτινοβολίας μπορεί να έχουν απρόσμενα αποτελέσματα στα υδάτινα οικοσυστήματα.

Ο διαλυμένος ανόργανος άνθρακας (dissolved inorganic carbon, DIC), ο διαλυμένος οργανικός άνθρακας (dissolved organic carbon DOC) και οργανικός άνθρακας σε μορφή ξέχωρων σωματιδίων (particulate organic carbon POC) είναι οι πιο γνωστές δεξαμενές άνθρακα στα υδάτινα οικοσυστήματα. Στην εικόνα 4 φαίνεται ο κύκλος του άνθρακα σε λίμνη με μεγάλη σκληρότητα (Λίμνη Lawrence Michigan). Σε αυτό το διάγραμμα αναδεικνύεται πόσο σύνθετες είναι οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται στον κύκλο του άνθρακα στην συγκεκριμένη λίμνη , αλλά δεν αποτελεί σημείο αναφοράς για τον κύκλο του άνθρακα που λαμβάνει χώρα σε όλες τις λίμνες.

Η δεξαμενή ανόργανου άνθρακα περιέχει το CO_2 , $HC O_3^-$ και $C O_3^{2-}$. Η αλλαγή κατεύθυνσης των αντιδράσεων ακολουθεί τους κανόνες της ανθρακικής ισορροπίας και έμμεσα επηρεάζεται από το pH, την φωτοσύνθεση και την αναπνοή των υδρόβιων οργανισμών. Η πιο σημαντική πηγή $C O_2$ είναι η ατμόσφαιρα. Οι πιο σημαντικές πηγές διαλυμένου οργανικού άνθρακα DOC είναι από την απέκκριση των υδρόβιων οργανισμών και από την αυτόλυση των αποσαθρωμάτων. Τα προϊόντα της απέκκρισης χρησιμοποιούνται άμεσα ιδιαίτερα από τα βακτήρια και έτσι δεν υπάρχει συσσώρευση. Ο οργανικός άνθρακας τύπου (C – particulate organic carbon, αποτελείται από άνθρακα δεσμευμένο στους οργανισμούς και στο υλικό αποσάθρωσης. Η πρωτογενής παραγωγικότητα με όλες τις διεργασίες της είναι πηγή POC. Η μορφή POC στην συνέχεια μετατρέπεται διαμέσου της αναπνοής σε ανόργανο άνθρακα (DIC) και διαμέσου της απέκκρισης σε διαλυμένο οργανικό άνθρακα (DOC) (Wetzel,2001).

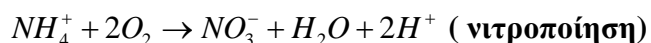


Εικόνα 4 Ο κύκλος του άνθρακα στην λίμνη Lawrence (Michigan) (Wetzel, 1983).

1.3.2 Αζώτο

Η πιο διαδεδομένη μορφή αζώτου στις λίμνες είναι αυτή του μοριακού αζώτου N_2 , όμως μόνο λίγοι οργανισμοί μπορούν να την αφομοιώσουν. Για τους αυτότροφους οργανισμούς οι οποίοι δεν παράγουν νιτρογεννάση, τα διαλυμένα νιτρικά (NO_3^{2-}), νιτρώδη (NO_2^-) και αμμωνιακά ιόντα (NH_4^+) είναι οι πιο σημαντικές ανόργανες μορφές αζώτου (Lampert et.al.1994). Η μετατροπή των νιτρικών ιόντων σε νιτρώδη και αμμωνιακά απαιτεί μια σειρά βιοχημικών αντιδράσεων με την συμμετοχή οργανισμών κυρίως βακτηρίων σε συνθήκες παρουσίας ή έλλειψης οξυγόνου (Σίνης, 2005).

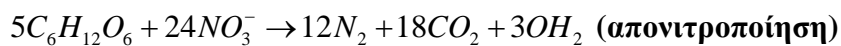
Η νιτροποίηση η οποία λαμβάνει χώρα σε συνθήκες παρουσίας οξυγόνου μετατρέπει αμμωνιακά ιόντα (NH_4^+) σε νιτρικά ιόντα (NO_3^-) μέσω του ενδιάμεσου σταδίου των νιτρώδων ιόντων (NO_2^-) σύμφωνα με την περιληπτική αντίδραση:



Καθώς η διαδικασία αυτή απαιτεί οξυγόνο δημιουργείται ένα χαρακτηριστικό προφίλ με το βάθος στις ευτροφικές λίμνες.

Η απονιτροποίηση πραγματοποιείται σε αναερόβιες συνθήκες, όπως σε ανοξικά ιζήματα και σε αναερόβιες μικροζώνες. Τα βακτήρια που συμμετέχουν στην απονιτροποίηση προσλαμβάνουν ενέργεια μέσω της οξείδωσης του οργανικού άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και των ανθρακικών ιόντων (CO_3^-) χρησιμοποιώντας το οξυγόνο των νιτρικών ιόντων (NO_3^-). Ταυτόχρονα τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται κατά την οξείδωση μεταφέρονται στο άζωτο το οποίο σταδιακά μετατρέπεται σε αέριο (N_2).

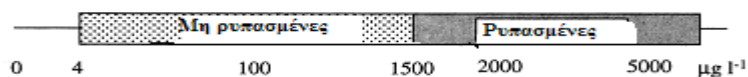
Επιπρόσθετα, τα βακτήρια απονιτροποίησης αποκτούν τον άνθρακα τον οποίο και χρησιμοποιούν για να παρασκευάσουν νέα βιομάζα. Η αντίδραση της απονιτροποίησης μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:



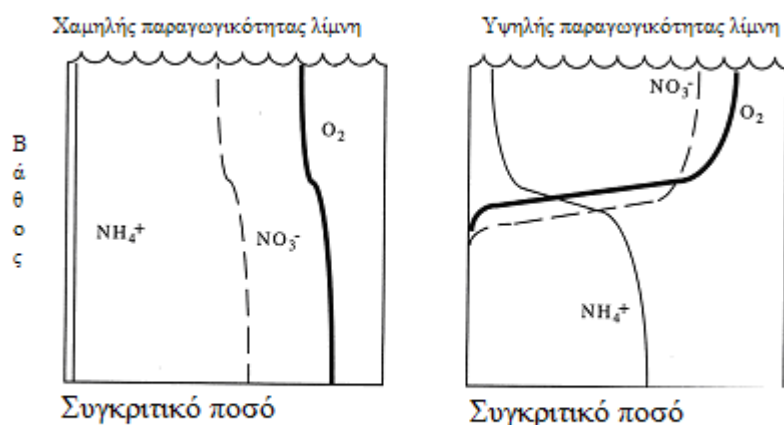
Το μόριο του αζώτου χάνεται στην ατμόσφαιρα εάν δεν χρησιμοποιηθεί και αν δεν δεσμευτεί.

Οι συγκεντρώσεις αζώτου στις λίμνες διαφέρουν από 100 $\mu g/l$ έως 6000 $\mu g/l$ Εικόνα 5. σύμφωνα με την οικολογική κατάσταση των λιμνών. Στις ολιγοτροφικές λίμνες, τα αμμωνιακά ιόντα (NH_4^+) απαντώνται μόλις σε χαμηλά επίπεδα και επιδεικνύουν μικρή μεταβολή με το βάθος εξαιτίας της παρουσίας οξυγόνου σε όλη την στήλη του νερού. Στις ευτροφικές λίμνες, οι διεργασίες είναι πιο σύνθετες εξαιτίας της εκροής αμμωνιακών ιόντων (NH_4^+) από το ίζημα σαν αποτέλεσμα της βακτηριακής αποσύνθεσης του οργανικού υλικού και τις χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου εικόνα6. Γενικά η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) ακολουθεί την

καμπύλη του οξυγόνου. Στις ευτροφικές λίμνες όπου η συγκέντρωση οξυγόνου είναι χαμηλή στις βαθύτερες περιοχές, τα περισσότερα νιτρικά ιόντα απονιτροποιούνται.(Bronmark and Hansson,1998).



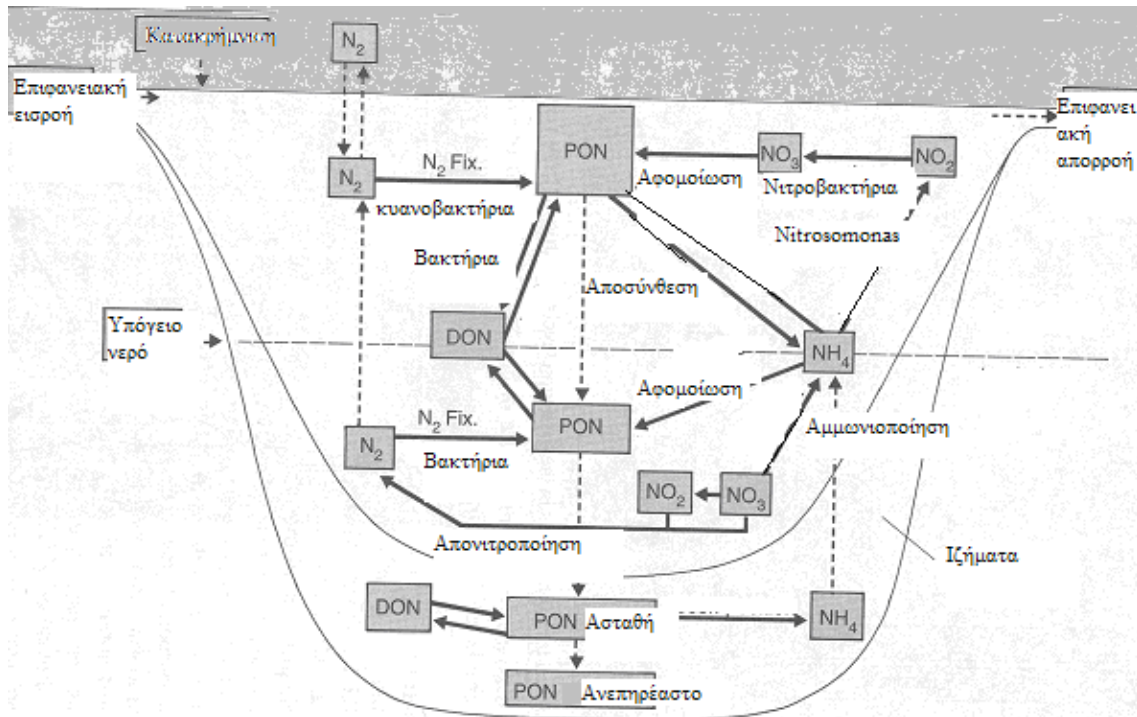
Εικόνα 5. Η αναλογία της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου στις λίμνες (καλοκαιρινές τιμές)



Εικόνα 6 Κάθετη διασπορά του οξυγόνου (O_2), των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) και των αμμωνιακών (NH_4^+) σε στρωματοποιημένες λίμνες με χαμηλή παραγωγικότητα (ολιγοτροφικές) και υψηλή παραγωγικότητα (ευτροφικές).

Το διαλυμένο οργανικό άζωτο (DON) παράγεται από την απέκκριση των οργανισμών και την αποσύνθεση του αποσθρωτικού υλικού. Αποτελείται κυρίως από πολυπεπίδια και άλλες σύνθετες ομάδες αμινών (Wetzel,2001).

Ένα σχήμα που περιγράφει τον κύκλο του αζώτου εμφανίζεται στο Εικόνα 7. Όπου υπάρχει οξυγόνο στο υπολίμνιο οι ανοξικές συνθήκες και οι συνδεδεμένες με αυτές μετατροπές πραγματοποιούνται μόνο στα ιζήματα.



Εικόνα 7 Ο κύκλος του αζώτου σε λίμνη με ανοξικό υπολίμνιο. Οι διακεκομμένες γραμμές αποδίδουν τις διεργασίες μεταφοράς, ενώ οι συνεχόμενες τις βιολογικές και τις χημικές διεργασίες (Wetzel, 1983).

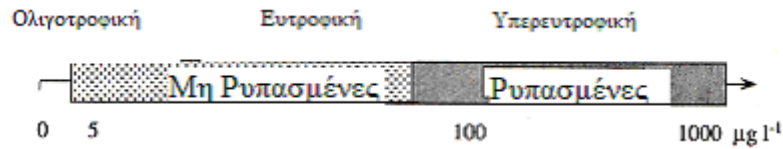
1.3.3 Φώσφορος

Ο φώσφορος είναι το βασικό στοιχείο για όλους τις οργανισμούς καθώς χρησιμοποιείται σε θεμελιώδεις διαδικασίες όπως αποθήκευση και μεταφορά γενετικής πληροφορίας (DNA, RNA) κυτταρικό μεταβολισμό και το ενεργειακό σύστημα των κυττάρων (τριφωσφορική αδενοσίνη, ATP).

Ο φώσφορος απορροφάται ως φωσφορικά ιόντα (PO_4^{3-}), η μόνη μορφή του φωσφόρου που έχει μεγάλη σημασία για τους οργανισμούς. Ο περισσότερος φώσφορος στο νερό, συνήθως πάνω από 80% περιλαμβάνει τον οργανικό φώσφορο.

Το σύνολο των κλασμάτων - μορφών του φωσφόρου συμπεριλαμβανομένων των ανόργανων και των οργανικών σχηματισμών, καλείται ως ο ολικός φώσφορος και ευρέως χρησιμοποιείται διαδεδομένα σαν εκτίμηση της ποιότητας νερού της λίμνης.

Ο φώσφορος εισάγεται στη στήλη νερού της λίμνης είτε απευθείας από το ίζημα είτε από την ατμοσφαιρική εναπόθεση. Οι περισσότερες φυσικές λίμνες (οι οποίες θεωρούνται αδιατάρακτες, (είναι δηλαδή εντελώς ανέπαφες από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και παρεμβάσεις) έχουν συγκεντρώσεις μεταξύ 1-100 $\mu\text{g/l}$ (Εικόνα 8). Τις τελευταίες δεκαετίες εξαιτίας των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, οι περισσότερες λίμνες που βρίσκονται κοντά σε αστικά κέντρα έχουν αισθητά υψηλότερες συγκεντρώσεις από αυτές που συναντάμε στις αδιατάρακτες λίμνες. Ο φώσφορος είναι το στοιχείο με τη συγκέντρωση του οποίου γενικά περιορίζεται η ανάπτυξη των πρωτογενών παραγωγών στα εσωτερικά νερά. Η συγκέντρωση του φωσφόρου είναι ευκολότερο να μετρηθεί από τον άνθρακα έτσι το να διαπιστωθεί εάν μια λίμνη είναι oligotroφική ή eutroφική στηρίζεται στην μέτρηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου. Συνεπώς oligotroφες λίμνες χαρακτηρίζονται εκείνες που έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις φωσφόρου 5-10 $\mu\text{g/l}$ και χαμηλή παραγωγικότητα. Λίμνες με συγκεντρώσεις φωσφόρου μεταξύ 10-30 $\mu\text{g/l}$ χαρακτηρίζονται ως mesotroφες ενώ λίμνες με συγκεντρώσεις πάνω από 30 -100 $\mu\text{g/l}$ χαρακτηρίζονται ως eutroφες. Τέλος λίμνες με συγκεντρώσεις πάνω από 100 $\mu\text{g/l}$, χαρακτηρίζονται ως υπερeutroφες (Εικόνα 10). Οι λίμνες κυμαίνονται από το όριο του υποoligotroφικού νερού των λιμνών πολιικών περιοχών (ολικός φώσφορος έως 5 $\mu\text{g/l}$) έως το όριο του υπερtroφικού επιπέδου. Οι ρυπασμένες λίμνες (Polluted lakes) αναφέρονται σε λίμνες που δέχονται θρεπτικά συστατικά από τις διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες .



Εικόνα 8 Αναλογία της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου στις λίμνες σε $\mu\text{g l}^{-1}$

Το ιζήμα γενικά είναι πλουσιότερο σε φώσφορο σε σχέση με το λιμναίο νερό και πολλοί παράγοντες μπορεί να επιδράσουν την μεταφορά του φωσφόρου μεταξύ του ιζήματος και του νερού. Ένας από αυτούς είναι το pH, το οποίο επηρεάζει την ανταλλαγή του φωσφόρου μεταξύ του ιζήματος και του νερού. Για pH κάτω από 8 οι δεσμοί των φωσφορικών με τα μέταλλα είναι ισχυροί, ενώ σε pH υψηλότερο η υδροξυλική ρίζα ανταλλάσσεται με τα φωσφορικά, τα οποία γίνονται διαλυτά στο νερό. Η πρωτογενής παραγωγικότητα αυξάνει το pH στο νερό και έτσι προωθείται η απελευθέρωση φωσφόρου σε διαδοχή με περαιτέρω μεγαλύτερη υψηλή παραγωγή φυκών (Bronmark and Hansson, 1998).

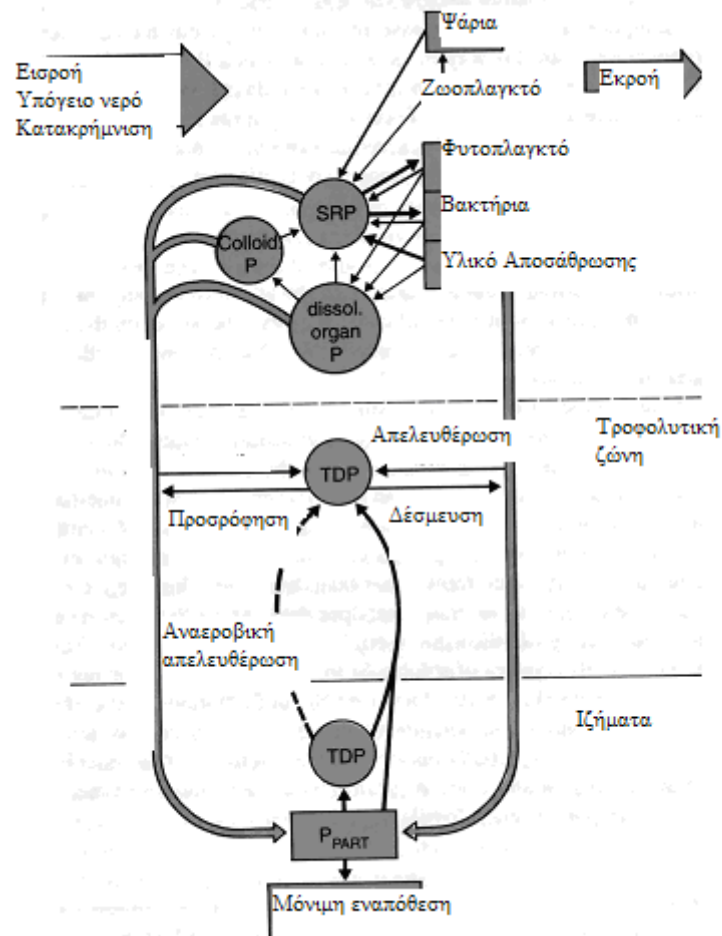
Σε αντίθεση με το άζωτο στα οικοσυστήματα, ο φώσφορος συναντάται ελεύθερος μόνο με την μορφή των φωσφορικών ιόντων (ορθοφωσφορικά). Συνήθως ο φώσφορος βρίσκεται συνδεδεμένος σε οργανικά συστατικά με δεσμούς εστέρα μεταξύ παραγώγων φωσφορικών οξέων και δεσμούς άνθρακα. Τα ορθοφωσφορικά ιόντα είναι λιγότερο κινητικά από το άζωτο στα ιζήματα και κατακρημνίζονται πιο εύκολα αφού συνδυάζονται με αρκετά κατιόντα (Al, Fe, Ca) και δημιουργούν ενώσεις αδιάλυτες οι οποίες προσροφώνται στην ιλύ. Εάν το φορτίο του φωσφόρου δεν αυξηθεί τεχνητά με τις ανθρωπογενείς επιδράσεις (απόβλητα, ρήψη

απορρυπαντικών) οι λίμνες προσλαμβάνουν περισσότερο άζωτο από ότι φώσφορο στην επιφάνεια αλλά και από τα υπόγεια νερά.

Το σημαντικότερο ποσό διαλυτού αντιδρώντα φωσφόρου λαμβάνεται από τα φύκη και τα βακτήρια. Σημαντικές εσωτερικές ενισχύσεις των ποσοτήτων του φωσφόρου πραγματοποιούνται διαμέσου της απέκκρισης των έμβιων οργανισμών και της αποσύνθεσης των συστατικών τα οποία δεν επαναντιδρούν με τα ένζυμα των μικροβίων (φωσφατάσες).

Κατά την διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης, ο διαλυτός αντιδρώνς φώσφορος στο επιλίμνιο μπορεί να ελαττωθεί. Κατά τις περιόδους στις οποίες το ζωοπλαγκτόν θηρεύει το φυτοπλαγκτόν σε μεγαλύτερο βαθμό από τον βαθμό κατά τον οποίο παράγεται το φυτοπλαγκτόν, η συγκέντρωση του διαλυτού ενεργού φωσφόρου αυξάνει. Ο διαλυτός ενεργός φώσφορος και ο σωματιδιακός φώσφορος παρουσιάζουν εποχιακές αλλαγές εξαιτίας της ιζηματοποίησης. Ο ολικός φώσφορος συνήθως ελαττώνεται στο επιλίμνιο κατά την διάρκεια των περιόδων στρωμάτωσης εκτός αν υπάρξει προσθήκη εξωτερικής πηγής. Καθώς το θερμοκλινές βαθαίνει υπάρχει μια ανάμειξη του πλούσιου σε φώσφορο επιλιμνίου, η οποία προκαλεί ακόμη μια αύξηση του ολικού φωσφόρου στο επιλίμνιο.

Το παρακάτω σχήμα Εικόνα 9 δείχνει ένα διάγραμμα του κύκλου του φωσφόρου σε μια στρωματοποιημένη λίμνη. Ο φώσφορος μετακινείται στα ιζήματα διαμέσου της βύθισης των οργανισμών και της προσρόφησης από τη βυθιζόμενη λάσπη ανόργανων και ασβεστολιθικών σωματιδίων.



Εικόνα 9 Διάγραμμα του κύκλου του φωσφόρου σε στρωματοποιημένη λίμνη (Lambert,& Sommer,1997).

Οι συνθήκες οξειδοαναγωγής στο στρώμα μεταξύ του ιζήματος και του νερού έχει κριτική σημασία για να προσδιορίσουμε την τύχη του φωσφόρου στα ιζήματα. Η συγκέντρωση του φωσφόρου στο ανοξικό διάκενο του νερού ενός ιζήματος είναι πάντοτε μεγάλης σημασίας και εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές από ότι στο νερό του υδάτινου σώματος. Ανάλογα με τη συγκέντρωση του φωσφόρου στο ιζημα μπορεί να υπάρξει διάχυση του από το ιζημα προς την στήλη νερού. Όπου το νερό και το επιφανειακό στρώμα του ιζήματος είναι οξυγονωμένα απαντούνται ιόντα του σιδήρου. Ο φώσφορος που βρίσκεται στα ιζήματα σχηματίζει ένα σύμπλοκο με το τριοξείδιο του σιδήρου $\text{Fe}(\text{OH})_3$ το οποίο κατακρημνίζεται. Κατά την αναγωγή των

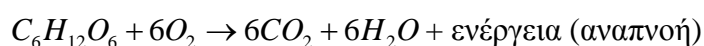
iónτων σιδήρου Fe^{+3} σε Fe^{+2} , το σύμπλοκο διαλύεται και ο φώσφορος επιστρέφει στην διάλυση. Η ελάττωση του σιδήρου συμβαίνει όταν το δυναμικό οξειδαναγωγής είναι της τάξης των 0,2-0,3 mV, το οποίο μπορεί να απαντηθεί στο υπολίμνιο των ευτροφικών λιμνών σε μια συγκέντρωση οξυγόνου περίπου 0,1 mg/l, δηλαδή σε έντονα αναγωγικές συνθήκες (Lambert & Sommer, 1997).

Έτσι ο φώσφορος συγκεντρώνεται στο ανοξικό υπολίμνιο από την στιγμή που παραμένει διαλυμένος και δεν κατακρημνίζεται πίσω στα ιζήματα. Περιστασιακές αναταράξεις προκαλούν την ανάμειξη του θερμοκλινούς η οποία προκαλεί την μεταφορά του φωσφόρου στο επιλίμνιο και την ανάπτυξη των φυκών. Στην συνέχεια οδηγούμαστε στην περαιτέρω κατανάλωση του οξυγόνου στο επιλίμνιο και σε μεγαλύτερη απελευθέρωση του φωσφόρου από τα ιζήματα. Με αυτό τον τρόπο το ίζημα λειτουργεί ως παγίδα φωσφόρου όσο η επιφάνειά του οξυγονώνεται και υπάρχει επάρκεια διαλυμένου οξυγόνου και ως πηγή φωσφόρου στην περίπτωση της πρόκλησης ανοξικών συνθηκών. Επίσης υπάρχει και κάποια απελευθέρωση φωσφόρου στο νερό του υπολίμνιου από τα οξυγονωμένα ιζήματα εξαιτίας της απέκκρισης των βενθικών οργανισμών και από την μηχανική αναμόχλευση που προκαλούν στα ανώτερα μερικά εκατοστά .

Οι συγκεντρώσεις φωσφόρου εκφράζονται σε mg/l ή ppm. Στις περιπτώσεις που οι συγκεντρώσεις του είναι πολύ μικρές αυτές εκφράζονται σε mg/l. Σε πολλές περιβαλλοντικές μελέτες οι συγκεντρώσεις των ορθοφωσφορικών εκφράζονται ως προς τη φωσφορική ρίζα χρησιμοποιώντας την ισοδυναμία $1 \text{ mg P/L} = 3.066 \text{ mg PO}_4^{3-} \text{ mg/L}$ (Αντωνόπουλος, 2003).

1.3.4 Οξυγόνο

Το οξυγόνο είναι μια αναγκαία απαίτηση για όλους τους αερόβιους οργανισμούς η οποία συμπεριλαμβάνει την πλειονότητα των ειδών που διαβιούν στα εσωτερικά νερά. Οι εποχιακές και χωρικές αλλαγές στην διαθεσιμότητα του οξυγόνου επηρεάζουν την ζωή τους, τα μοντέλα διασποράς, την συμπεριφορά και τις αλληλεπιδράσεις τους με άλλους οργανισμούς. Η πλειονότητα των εισόδων οξυγόνου στις λίμνες είναι διαμέσου της διάχυσης από την ατμόσφαιρα και από την απελευθέρωση από τα φυτά κατά την διάρκεια της φωτοσύνθεσης. Το οξυγόνο στα εσωτερικά νερά καταναλώνεται από τους οργανισμούς με την αεροβική αναπνοή κατά την διάρκεια των σύνθετων βιοχημικών διεργασιών του μεταβολισμού όπου τα θρεπτικά μόρια (υδατάνθρακες, λίπη και πρωτεΐνες) διασπώνται και το υδρογόνο απελευθερώνεται και στην συνέχεια αντιδρά με το οξυγόνο. Η ενέργεια που περιέχεται στους χημικούς δεσμούς των θρεπτικών μορίων μεταφέρεται στα μόρια της τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP) τα οποία χρησιμοποιούνται από τον οργανισμό για λειτουργία και βιοσύνθεση. Η διαδικασία της αερόβιας αναπνοής μπορεί να περιγραφεί ως εξής:



Και όπως φαίνεται στην αντίδραση παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και νερό ως προϊόντα αυτής της διαδικασίας.

1.3.4.1 Παράγοντες που επιδρούν στην συγκέντρωση οξυγόνου

Το ποσό του οξυγόνου το οποίο το νερό μπορεί να βρίσκεται διαλυμένο σε ένα υδάτινο σώμα ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το ποσό του οξυγόνου σε διάλυση σε δεδομένη στιγμή είναι ευαίσθητο σε αλλαγές σε σχέση με τις φυσικές διεργασίες, όπως ανάμιξη και δράση των κυμάτων και βιολογικές διεργασίες όπως η φωτοσύνθεση και η αναπνοή. Για παράδειγμα κατά την διάρκεια των περιόδων

υψηλής φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, το νερό γίνεται υπερκορεσμένο σε οξυγόνο, ενώ όταν οι διεργασίες της αποσύνθεσης κυριαρχούν τότε το οξυγόνο ελαττώνεται δραματικά.

Έτσι το πραγματικό ποσό διαλυμένου στο νερό οξυγόνου μπορεί να εκτραπεί από το θεωρητικό μέγιστο (οξυγόνου κορεσμού), και επομένως το οξυγόνο του νερού συχνά δηλώνεται ως ποσοστό της θεωρητικής τιμής από την δοθείσα θερμοκρασία. Τα φυσικά χαρακτηριστικά του νερού επηρεάζουν την διαθεσιμότητα του οξυγόνου για τους υδρόβιους οργανισμούς, ιδιαίτερα η αργή διάχυση και η αργή διαλυτότητα του οξυγόνου.

1.3.4.2 Χωρικά και εποχικά μοντέλα στην διαθεσιμότητα του οξυγόνου.

Εποχική στρωμάτωση

Οι εποχιακές αλλαγές της θερμοκρασίας έχουν ως αποτέλεσμα τα μοντέλα στρωμάτωσης να είναι κρίσιμα για την κατανόηση της δυναμικής του διαλυμένου οξυγόνου των λιμνών. Κατά την διάρκεια της άνοιξης, όπου το νερό ξεκινά να θερμαίνεται, οι διαφορές στην υδάτινη πυκνότητα είναι μικρές και η λίμνη αναμιγνύεται με την δράση του ανέμου. Το οξυγόνο στην επιφάνεια του νερού κατανέμεται σε όλη την υδάτινη στήλη και τα επίπεδα κορεσμού βρίσκονται κοντά στο 100%. Με την αύξηση των θερμοκρασιών το καλοκαίρι η λίμνη θα στρωματωθεί σε δυο σταθερά στρώματα (το επιλίμνιο και το υπολίμνιο) τα οποία δεν αναμιγνύονται. Το ατμοσφαιρικό οξυγόνο μπορεί να διαλυθεί και να διανεμηθεί μέσα στο επιλίμνιο στρώμα, αλλά δεν αναμειγνύεται στο υπολίμνιο.

Η δεύτερη μεγάλη πηγή οξυγόνου είναι η φωτοσύνθεση η οποία εξαρτάται από την διαθεσιμότητα του φωτός, το οποίο μειώνεται με το βάθος. Κάτω από την εύφωτη ζώνη, το φως είναι ανεπαρκές για να επιτραπεί η διαδικασία της φωτοσύνθεσης και της παραγωγής οξυγόνου. Η διάσπαση του οργανικού υλικού από

τα βακτήρια στο υπολίμνιο ή στο μεσοδιάστημα ιζήματος και νερού πάνω από το ίζημα, μαζί με την αναπνοή των βενθικών ασπόνδυλων, καταναλώνει σημαντικά ποσά οξυγόνου και καθώς δεν υπάρχει πηγή εισόδου του οξυγόνου, τα επίπεδα οξυγόνο στο υπολίμνιο ελαττώνονται κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Με την αυξανόμενη παραγωγικότητα των ευτροφικών λιμνών, η ποσότητα του οργανικού υλικού στο υπολίμνιο είναι μεγαλύτερη και η ελάττωση του οξυγόνου γρηγορότερη και τελικά το οξυγόνο μηδενίζεται στο υπολίμνιο. Έτσι το υπολίμνιο είναι δύσκολο να αποτελέσει τόπο διαβίωσης για τα περισσότερα ζώα και φυτά κατά την διάρκεια μεγάλου τμήματος του καλοκαιριού.

Το φθινόπωρο, το ποσό της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην λίμνη ελαττώνεται και μαζί μειώνονται και οι θερμοκρασίες. Τελικά το νερό αναστρέφεται όπως αναλυτικά περιγράφηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια και οξυγονωμένο νερό κυκλοφορεί στο βαθύτερο στρώμα. Κατά τον σχηματισμό κάλυμμα πάγου στην διάρκεια του χειμώνα, η ανταλλαγή του οξυγόνου με την ατμόσφαιρα εμποδίζεται. Εάν ο πάγος είναι διαφανής, θα υπάρχει μια σημαντική παραγωγή οξυγόνου από τα άλγη που φωτοσυνθέτουν αμέσως κάτω από τον πάγο ενώ στα βαθύτερα στρώματα η κατανάλωση του οξυγόνου κυριαρχεί. Το ποσό του οξυγόνου θα ελαττωθεί καθώς αυξάνει το βάθος και θα είναι ιδιαίτερα χαμηλό κοντά στον πυθμένα. Εάν ο πάγος καλυφθεί με παχύ στρώμα χιονιού, η φωτοσύνθεση και η κατανάλωση οξυγόνου σχεδόν καταστέλλεται εξ' ολοκλήρου από την έλλειψη φωτός. Εάν αυτό συνεχιστεί για μεγάλη περίοδο το οξυγόνο στην λίμνη εξαντλείται ολοκληρωτικά με αποτέλεσμα την θνησιμότητα των ψαριών. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται χειμερινή θανάτωση (winterkill) και είναι φαινόμενο συνηθισμένο σε ρηχές, εύτροφες λίμνες όπου η αποικοδόμηση της νεκρής ύλης καταναλώνει μεγάλες ποσότητες οξυγόνου.

1.3.4.3 Οξυγόνο κορεσμού

Η συγκέντρωση του οξυγόνου κορεσμού δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, τη βαρομετρική πίεση και την αλατότητα του νερού. Τιμές κορεσμού για το γλυκό νερό δίνονται από πίνακες, αλλά μπορεί να υπολογισθούν και με τη σχέση :

$$O_s = \frac{0.678(P - e)}{T + 35}$$

στην οποία O_s είναι η συγκέντρωση οξυγόνου που αντιστοιχεί στον κορεσμό (mg/l), P είναι η βαρομετρική πίεση εκφρασμένη σε mm στήλης υδραργύρου (**κανονική πίεση=760 mm Hg**), e είναι η πίεση κορεσμού των υδρατμών στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος που επίσης εκφράζεται σε mm Hg και T είναι η θερμοκρασία σε °C. Τιμές του e δίνονται στον Πίνακα 1. Η πίεση κορεσμού των υδρατμών μπορεί να υπολογιστεί και από την παρακάτω σχέση (Αντωνόπουλος 2003):

$$e(mmHg) = 7.501 \exp \left[\frac{16.78T - 116.9}{T + 273.15} \right]$$

όπου T είναι η θερμοκρασία σε °C.

Μια άλλη σχέση για τον προσδιορισμό του οξυγόνου στον κορεσμό με δεδομένα την θερμοκρασία και το υψόμετρο είναι η εξής (Bishop et al., 1976):

$$O_s = O_s' \left[\exp \left(-\frac{0.03419EL}{288.8 - 0.00649EL} \right) \right]$$

$$\text{όπου } O_s' = 24.8 - 0.4259T_f + 0.00373T_f^2 - 0.00001328T_f^3$$

Η θερμοκρασία T δίνεται σε °C, ενώ το υψόμετρο EL σε μέτρα.

Πίνακας 1 Πίεση κορεσμού υδρατμών σε mm Hg σε διάφορες θερμοκρασίες

Θερμοκρασία °C	Πίεση κορεσμού υδρατμών e,(mmHg)	Θερμοκρασία °C	Πίεση κορεσμού υδρατμών e, mmHg
1	4.93	22	19.83
4	6.10	25	23.76
7	7.51	28	28.35
10	9.21	31	33.70
13	11.23	34	39.90
16	13.63	37	47.07
19	16.48	40	55.32

Τα τελευταία χρόνια έγινε αποδεκτή η εξής σχέση εκτίμησης της συγκέντρωσης κορεσμού του οξυγόνου (APHA 1992, Chapra 1997).

$$\ln O_s = -139.34411 + (1.575701 \cdot 10^5 / T_a) - (6.642308 \cdot 10^7 / T_a^2) + (1.2438 \cdot 10^{10} / T_a^3) - (8.621949 \cdot 10^{11} / T_a^4)$$

όπου T_a είναι η απόλυτη θερμοκρασία (K)

$$T_a = T + 273.15$$

T η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου (°C).

Η διόρθωση λόγω της βαρομετρικής πίεσης γίνεται με τη σχέση (APHA, 1992)

$$O_s = O_{sf} P \left[\frac{(1 - e/P) - (1 - \theta P)}{(1 - e)(1 - \theta)} \right]$$

όπου P είναι η ατμοσφαιρική πίεση (atm), e είναι η μερική πίεση των υδρατμών (atm), O_{sf} . Η παράμετρος θ υπολογίζεται από τη σχέση

$$\theta = 0.000975 - 1.426 \cdot 10^{-5} T + 6.436 \cdot 10^{-8} T^2$$

Η διαλυτότητα του οξυγόνου μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων. Για το θαλασσινό νερό, η σχέση πολλαπλασιάζεται με τον παράγοντα $(1 - S/100000)$ στον οποίο S είναι η συγκέντρωση χλωρίου στο νερό εκφρασμένη σε ppm.

1.3.5 Μικροθρεπτικά

Η προμήθεια των μικροθρεπτικών Co, Cu, Zn, Mo από τα γειτονικά πετρώματα είναι πολύ χαμηλή. Από την στιγμή που η ανάγκη για αυτά τα στοιχεία είναι ακόμη χαμηλότερη, δεν επηρεάζουν αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών ή σπάνια επηρεάζουν αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών.

Το K και το Na είναι σημαντικά συστατικά στις λειτουργίες της κυτταρικής μεμβράνης, ενώ το πυρίτιο χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες από διάτομα και χρυσόφυτα για την κατασκευή των κυτταρικών τοιχωμάτων και λέπια. Το πυρίτιο μπορεί να εξαντληθεί κατά την άνθιση των διατόμων το οποίο καταλήγει σε μια κατακόρυφη πτώση της εμφάνισής τους (Bronmark and Hansson, 1998).

Το ασβέστιο Ca χρησιμοποιείται κυρίως για τον σχηματισμό του σκελετού των σπονδυλωτών αλλά δεν έχει ποτέ αναφερθεί ότι περιορίζει την ανάπτυξη των υδρόβιων ζώων. Επίσης τα μαλάκια έχουν μεγάλη ποσότητα ασβεστίου στα όστρακα.

1.3.6 Άλλα χημικά συστατικά

Η φυσική ποιότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων εξαρτάται από την ποιότητα και την σύνθεση του εδάφους της λεκάνης απορροής, αλλά και του υποστρώματος του ίδιου του πυθμένα. Το οργανικό υλικό των λιμναίων οικοσυστημάτων καθορίζεται απευθείας από την ανάλυση του ολικού οργανικού άνθρακα (Total

organic Carbon, TOC), ή πιο συχνά έμμεσα με την ανάλυση του BOD (Biological Oxygen Demand) του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου. Τα βαριά μέταλλα συχνά καθορίζονται με την ατομική απορρόφηση (Ζανάκη, 2001).

Το οικοσύστημα καθόλη την διάρκεια του έτους βρίσκεται προς αναζήτηση ισορροπίας ανάμεσα στον βίοτοπο και την βιοκοινωνία. Οι διαφοροποιήσεις είναι φυσικές και εξαρτώνται από την εποχή και τις καιρικές συνθήκες. Όλοι αυτοί οι παράγοντες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη προσεκτικά για την εκπόνηση σχεδίου παρακολούθησης. Η επιτυχία ενός σχεδίου παρακολούθησης απαιτεί μεγάλης διάρκειας μετρήσεις και συγκέντρωση υλικού των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

1.3.7 Ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού

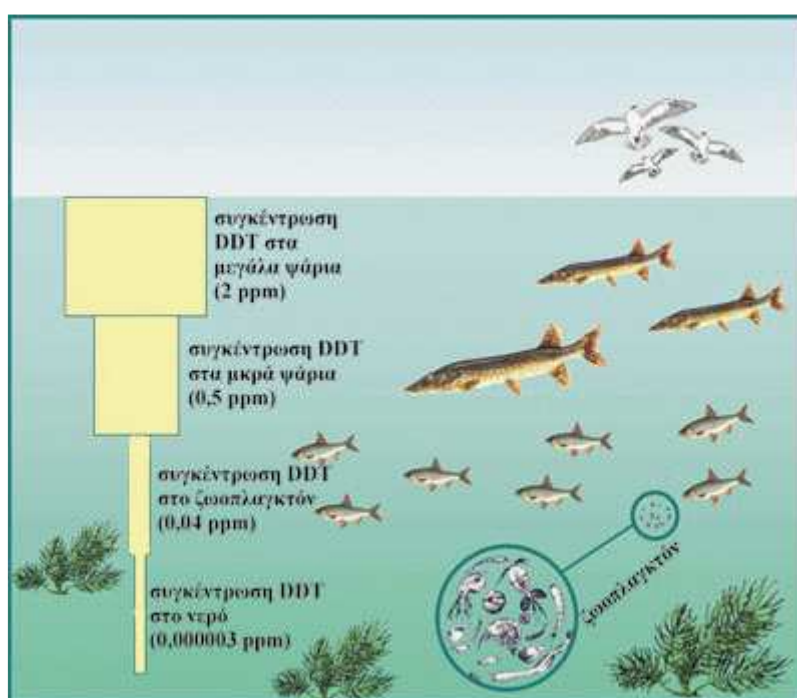
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού αναφέρεται στην ικανότητά του να μεταφέρει ηλεκτρικά φορτία και είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των ηλεκτρολυτών, των διαλυμένων δηλαδή στο νερό αλάτων. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται κυρίως από τη συγκέντρωση ιόντων στο νερό, το σθένος τους και την ευκινησία τους. Αυξημένες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας αντιστοιχούν σε μεγάλες συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών (ευτροφικές καταστάσεις), σε αύξηση συνεπώς της παραγωγικότητας του οικοσυστήματος και υποδηλώνουν την εηλικίωση (παλαίωση) της υδάτινης μάζας.

1.3.8 pH

Οι λίμνες παρουσιάζουν τοπικές αλλαγές στο pH εξαιτίας τις διαφορετικής γεωλογίας και υδρολογίας της λεκάνης απορροής, την είσοδο συστατικών που αυξάνουν την οξύτητα και την παραγωγικότητα του συστήματος αλλά το pH στην πλειοψηφία των λιμνών κυμαίνεται από 6-9.

1.3.9 Τοξικές ουσίες

Φυσικές και συνθετικές ουσίες όπως ο μόλυβδος Pb, ο υδράργυρος Hg, το κάδμιο Cd, οι φθοριούχες, οι ραδιενεργές ουσίες τα εντομοκτόνα κ.ά. μπορεί να είναι τοξικές για τους οργανισμούς του νερού. Η τοξικότητα των παραπάνω ουσιών είναι ανάλογη της συγκέντρωσής τους και εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στον υδάτινο αποδέκτη. Οι παραπάνω ουσίες διασπώνται αργά και βιοσυσσωρεύονται (Εικόνα 10).



Εικόνα 10. Η συγκέντρωση του DDT μεγεθύνεται στα ανώτερα τροφικά επίπεδα

1.4 Ευτροφισμός

Κατά την διάρκεια των δεκατιών 1950 και 1960 τόσο οι λίμνες γύρω από αστικές περιοχές όπως η λίμνες Παμβώτιδα και Ορεστιάδας, όσο και οι λίμνες γύρω από τις οποίες αναπτύχθηκαν γεωργικές δραστηριότητες υπέστησαν δραστικές μεταβολές. Υπάρχουν πολλές καταγραφές κατά τις οποίες λίμνες όπου χρησιμοποιούνταν για κολύμπι μετατράπηκαν σε λίμνες με αφθονία φυτοπλαγκτού, άσχημης οσμής και λασπώδεις πυθμένες. Τα αίτια για την αλλαγή δεν

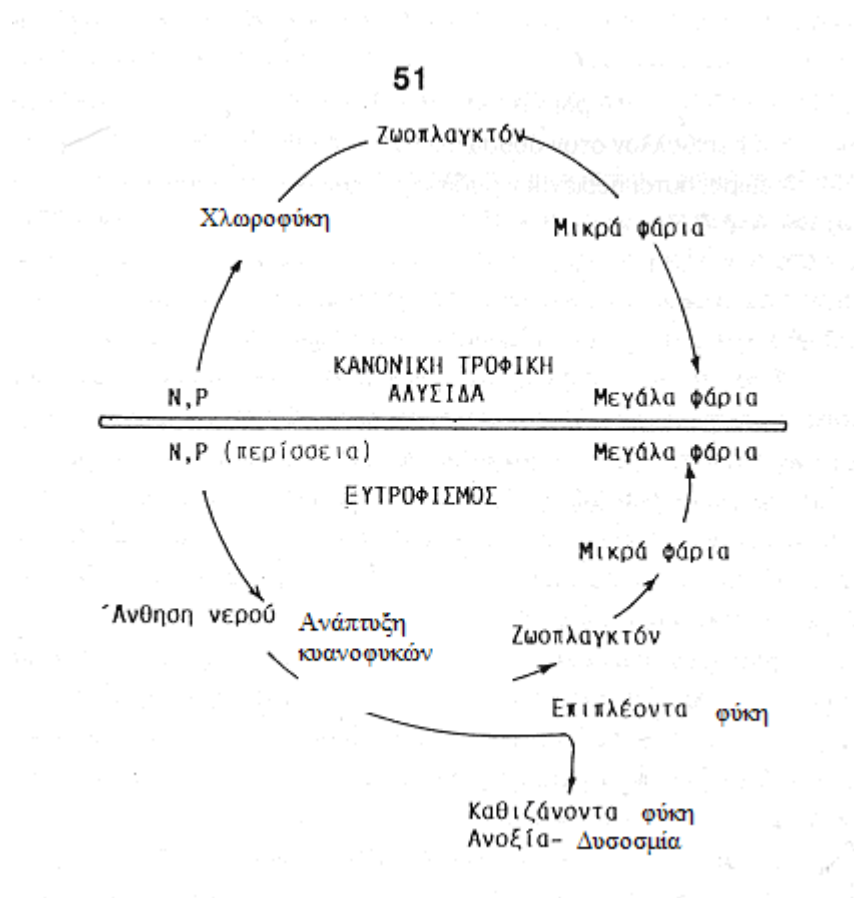
αναγνωρίστηκαν άμεσα αλλά η χρήση των λιμνών ως τελικούς αποδέκτες ακατέργαστων λυμάτων και λιπασμάτων από τις γεωργικές καλλιέργειες αποτέλεσαν τα πιο πιθανά αίτια. Η επιστημονική εξήγηση κατέληγε ότι ο φώσφορος αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα του ευτροφισμού στις λίμνες. Αυτή η εξήγηση αντικρούστηκε σθεναρά από τις βιομηχανίες κατασκευής απορρυπαντικών που είχαν αντικρουόμενα συμφέροντα. Όμως ένα πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε ολόκληρη λίμνη απέδειξε περίτρανα την ακρίβεια της επιστημονικής εξήγησης.

Σε αυτό το πείραμα μια λίμνη διαχωρίστηκε σε δυο τμήματα . Στο ένα τμήμα προστέθηκαν άνθρακας και άζωτο και στο άλλο προστέθηκε φώσφορος. Στο πρώτο τμήμα όπου προστέθηκαν το άζωτο και ο άνθρακας δεν υπήρχε κάποια αλλαγή στο περιβάλλον αντίθετα στο τμήμα που προστέθηκε ο φώσφορος παρουσιάστηκε το φαινόμενο άνθισης φυτοπλαγκτού (Schindler et.al, 1974).

Η διαδικασία ευτροφισμού στις λίμνες ενισχύεται με την προσθήκη του φωσφόρου από διάφορες πηγές όπως από τα αστικά λύματα και τις γεωργικές δραστηριότητες. Αυτή η προσθήκη προκαλεί αλυσιδωτές μεταβολές στο λιμναίο οικοσύστημα με πρωταρχικό στάδιο την μαζική ανάπτυξη των παραγωγών.

Η παρουσία μεγάλων συγκεντρώσεων σε θρεπτικά άλατα στις λίμνες και κυρίως στα αβαθή , ανατρέπει την φυσιολογική ροή της τροφικής αλυσίδας και οδηγεί σε ανεξέλεγκτη ανάπτυξη των φυκών και μακρόφυτων. Το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως ευτροφισμός. Όταν τα φύκια πεθαίνουν, η οργανική τους ύλη κατά την αποσύνθεση καταναλώνει το διαλυμένο οξυγόνο. Ταυτόχρονα τα απελευθερούμενα θρεπτικά άλατα, από την παρουσία των αποικοδομητών οργανισμών, αποτελούν εκ νέου το υπόβαθρο για την νέα αύξηση των φυκών και των μακρόφυτων. Η έλλειψη του οξυγόνου που συνοδεύει το φαινόμενο οδηγεί συχνά στο θάνατο των υδροβίων οργανισμών, και στην επικράτηση αναερόβιων διεργασιών που προκαλούν δυσοσμία.

Στην εικόνα 11 δίνεται παραστατικά η ανατροπή της ανάπτυξης των υδρόβιων οργανισμών λόγω ευτροφισμού.



Εικόνα 11 Ανατροπή ισορροπίας στην ανάπτυξη των υδρόβιων οργανισμών λόγω ευτροφισμού. (Αλμπάνης Τρ., 2005)

2. ΥΛΙΚΑ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Η παρακολούθηση (monitoring) των λιμνών

2.1.1 Γενικά για την παρακολούθηση

Η κατάσταση της ποιότητας του νερού είναι ένα σύνθετο αποτέλεσμα φυσικών και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων στον χρόνο και τον χώρο. Η παρακολούθηση και η αποτίμηση των αποτελεσμάτων της απασχολεί μια σειρά από υπηρεσίες και διοικητικές αρχές.

Οι στόχοι της παρακολούθησης γενικά κατευθύνονται από μια σειρά νόμων έχοντας στόχο την προσέγγιση και εκτίμηση της περιβαλλοντικής κατάστασης και ανίχνευση των τάσεων. Πολλά προγράμματα παρακολούθησης υπηρετούν σειρά στόχων. Το δίκτυο παρακολούθησης αφορά τα υδάτινα οικοσυστήματα (πηγές, ρέματα, ποτάμια, λίμνες, φιόρδ, εκβολές παράκτια νερά και θαλασσινά νερά). Περιλαμβάνει δυο τύπους έναν εκτατικό κατά τον οποίο εμπεριέχονται πολλοί σταθμοί δειγματοληψίας αλλά λαμβάνονται λίγα δείγματα ετησίως, στα οποία αναλύονται λίγοι παράμετροι και η διάρκεια του είναι από ένα έτος έως 3-4 έτη. Και τον εντατικό κατά τον οποίο περιλαμβάνονται περισσότεροι σταθμοί (ανάλογα με την έκταση της περιοχής μελέτης, πολλά ετήσια δείγματα τουλάχιστον 12, τα οποία πραγματοποιούνται για χρόνια (πάνω από 4).

Οι παράμετροι οι οποίοι μετρούνται είναι χωρισμένοι στις παρακάτω κατηγορίες:

Βασικοί παράμετροι :

- Θερμοκρασία νερού,
- pH
- Αγωγιμότητα
- Διαλυμένο οξυγόνο
- Δυναμικό οξειδοαναγωγής
- Αλατότητα

και επιπλέον συμπληρωματικοί παράμετροι , όπως:

- Θολότητα
- Δείκτες οργανικής ρύπανσης (διαλυμένο οξυγόνο,BOD ,COD, αμμωνία)
- Δείκτες ευτροφισμού θρεπτικά(άζωτο, φώσφορο) και διάφοροι βιολογικοί παράγοντες (χλωροφύλλη-α).
- Δείκτες αλκαλικότητας (pH, αλκαλικότητα, νιτρικά, δείγματα διατόμων κ.α)
- Ανίχνευση ιόντων (χλωρίου, θείου, μαγνησίου κ.α)
- Μέταλλα (Κάδμιο, υδράργυρος, χαλκός, ψευδάργυρος)
- Οργανικοί μικρορυπαντές (PCB, HCH)
- Ραδιενεργοί δείκτες
- Μικροβιολογικοί δείκτες (συνολικά κολοβακτηρίδια, στρεπτόκοκκοι)
- Βιολογικοί δείκτες (ποσότητα και σύνθεση του φυτοπλαγκτού-ζωοπλαγκτού, ζωοβένθους, ψαριών, μακρόφυτων).

2.1.2 Παρακολούθηση λιμνών με συστηματική δειγματοληψία

Η υπάρχουσα τεχνολογία βασίζεται στην μέτρηση των παραμέτρων ελέγχου ποιότητας με επιτόπου μετρήσεις πεδίου είτε με συλλογή των δειγμάτων και καταμέτρηση των παραμέτρων στο εργαστήριο. Η δειγματοληψία στις λίμνες με σκοπό τον καθορισμό της ποιότητας του νερού είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Οι μεθοδολογίες που ακολουθούνται στις δειγματοληψίες και η ερμηνεία των δεδομένων, έχουν σκοπό την εκτίμηση της διαθεσιμότητας των αβιοτικών και βιοτικών πόρων (Heinonen, Ziglio, Van der Beken, 2000).

Η δειγματοληψία είναι αναγκαίο να παρέχει πληροφόρηση από χαρακτηριστικό τμήμα του υδάτινου σώματος. Οι πιο κρίσιμοι παράγοντες που είναι αναγκαίο να

προσδιοριστούν είναι τα σημεία δειγματοληψιών , η συχνότητα της δειγματοληψίας και ο τρόπος διατήρησης της ακεραιότητας των δειγμάτων πριν την ανάλυση.

Για κάθε σταθμό, ο οποίος επιλέγεται σύμφωνα με τη μορφολογία κάθε περιοχής και την σκοπιμότητα των μετρήσεων τρία βάθη είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη. Π.χ 1m από την επιφάνεια, 1m πάνω από τον πυθμένα και στο ενδιάμεσο των προαναφερθέντων σημείων. Για τις ρηχές λίμνες, ο συνολικός αριθμός δειγμάτων μπορεί να ελαττωθεί.

Με σκοπό να καθοριστεί η συχνότητα δειγματοληψίας είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη η οικολογική και οικονομική σημασία του υδάτινου σώματος, τα μορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά ,οι διαφοροποιήσεις από χρόνο σε χρόνο της ποιότητας, η ποιότητα και η ποσότητα της διάθεσης των αποβλήτων στην λίμνη αλλά και οι τεχνικές και οικονομικές δυνατότητες.

Η δειγματοληψία είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται τουλάχιστο δυο φορές τον χρόνο π.χ μια κατά την αρχή της άνοιξης κατά την διάρκεια της πλήρης αναστροφής της στήλης του νερού και η άλλη κατά το τέλος της στρωμάτωσης του καλοκαιριού μόλις πριν την αναστροφή του φθινοπώρου (Premmazzi & Chiaudani,1992). Όμως επιθυμητές είναι βέβαια και περισσότερες δειγματοληψίες, όπως για παράδειγμα κάθε μήνα.

Η σύγχρονη λιμνολογία δεν θεωρεί την λίμνη ως ένα μεμονωμένο υδάτινο σώμα αλλά ως ένα μέρος ενός σύνθετου οικοσυστήματος το οποίο επίσης περιέχει την λεκάνη απορροής και την ατμόσφαιρα που εκτείνεται πάνω από αυτή. Η μελέτη των διάφορων διεργασιών απαιτεί μεθόδους παρακολούθησης ευρείας κλίμακας οι οποίες στην συνέχεια είναι αναγκαίο να προμηθεύσουν την πληροφορία σε συστήματα χωρικής και χρονικής ανάλυσης της πληροφορίας.

Για την αξιολόγηση των δεδομένων που προκύπτουν από την παρακολούθηση των υπό εξέταση οικοσυστημάτων των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής ένωσης, η μέτρηση της ποιότητας, η επαλήθευση της εξέτασης και η απεικόνιση σε σχήμα αποτίμησης της ποιότητας γίνεται όπως συνιστάται στα τεστ ποιότητας των διεθνών εργαστηρίων. Τα αποδεκτά, επαρκή και ικανοποιητικά επίπεδα ακρίβειας και ορίων εμπιστοσύνης δημιουργούνται σύμφωνα με:

- Αριθμό σταθμών που απαιτείται για την αποτίμηση της οικολογικής κατάστασης του κάθε υδάτινου σώματος
- Συχνότητα δειγματοληψίας για καθεμιά παράμετρο
- Επιλογή ακρίβειας και ορίων εμπιστοσύνης που δημιουργεί το πεδίο ανοχής των αποτελεσμάτων των προγραμμάτων παρακολούθησης.

2.1.3 Επίγεια τηλεμετρική αυτοματοποιημένη παρακολούθηση

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σημαντικά η σπουδαιότητα για την συνεχή (on-line) μέτρηση διαφόρων φυσικών και χημικών παραμέτρων σε λίμνες, ποτάμια, μονάδες κατεργασίας υγρών αποβλήτων κλπ. Οι κυριότερες εφαρμογές της τηλεμετρικής αυτοματοποιημένης παρακολούθησης είναι :

1. Ο αυτόματος έλεγχος με σκοπό τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.
2. Η συνεχής μέτρηση-καταγραφή στην έξοδο των μονάδων αυτών ώστε να ελέγχεται αν πληρούνται οι προδιαγραφές που έχουν καθορισθεί για τον αποδέκτη βάσει νομοθεσίας.
3. Η παρακολούθηση της ποιότητας του αποδέκτη.

Τα τελευταία χρόνια έχει επιτευχθεί σημαντική πρόοδος στους αναλυτές συνεχούς μέτρησης. Η ανάγκη για μεγάλο αριθμό αναλυτών και ολοκληρωμένη επεξεργασία των σημάτων τους με έλεγχο της αξιοπιστίας των δεδομένων και

συστήματα πρόγνωσης σφαλμάτων φαίνεται να κερδίζουν έδαφος στους υπεύθυνους παρακολούθησης μονάδων επεξεργασίας νερού και αποβλήτων, αλλά και στις υπηρεσίες παρακολούθησης επιφανειακών νερών. Αρκετοί είναι οι λόγοι που έχουν οδηγήσει σε μεγάλο βαθμό στην αξιοποίηση των αναλυτών συνεχούς μέτρησης σε σύγκριση με τα προηγούμενα χρόνια:

- Η τεχνολογία των αναλυτών έχει αναπτυχθεί πολύ. Σύνθετα όργανα όπως αναλυτές συνεχούς μέτρησης θρεπτικών (PO_4^{-3} , NO_3^{-2} κλπ) και τοξικόμετρα χρησιμοποιούνται ευρέως.
- Η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων δεν αποτελεί πια εμπόδιο. Υπάρχουν διαθέσιμα λογισμικά για την επεξεργασία των δεδομένων, δυναμικά μοντέλα απεικόνισης και προσομοίωσης με την συμμετοχή πραγματικών μετρήσεων, κλπ.
- Τα συστήματα επεξεργασίας δεδομένων σε συνδυασμό με την τεχνολογία αυτοματισμών, προσφέρουν δυνατότητες έγκαιρης προειδοποίησης σε περιπτώσεις συναγερμού (π.χ. ακόμα και με μήνυμα σε κινητό τηλέφωνο)
- Οι χρήστες των συστημάτων παρακολούθησης ποιότητας νερού και αποβλήτων είναι πιο εξοικειωμένοι με τους αναλυτές, υπολογιστές και την τεχνολογία των συστημάτων ελέγχου.
- Η θεωρία των συστημάτων ελέγχου και η τεχνολογία των αυτοματισμών αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο.

Τα αυτοματοποιημένα τηλεμετρικά συστήματα συνεχούς παρακολούθησης και καταγραφής περιβαλλοντικών παραμέτρων είναι ενεργειακά αυτόνομα, λειτουργούν υπό μορφή δικτύου δηλ. υπάρχει ένας σταθμός βάσης και ένας αριθμός περιφερειακών. Υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς περιοδικής (ανά μια ώρα) και πραγματικής (real time) μέτρησης με ηλεκτρονικό τρόπο ποιοτικών και ποσοτικών

παραμέτρων του νερού και μετεωρολογικών παραμέτρων. Οι εγκαταστάσεις δεν είναι μεγάλες και δεν έχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον (Psilonikos et.al, 2006; Ψιλοβίκος, 2005).

Στην εικόνα 12 φαίνεται ένας σταθμός παρακολούθησης .

Ο σταθμός αποτελείται από:

- Πολυκάναλο αισθητήρα (βυθιζόμενο τμήμα) που καταγράφει συγχρόνως και σε πραγματικό χρόνο προεπιλεγμένους παραμέτρους
- Πολυσυλλεκτικά ιοντικά ηλεκτρόδια
- Επίγεια μονάδα ελέγχου
- Μονάδα μεταφοράς δεδομένων μέσω δικτύου, OTE, GSM (παγκόσμιο σύστημα τηλεπικοινωνίας)
- Διπλό (twin) καλώδιο
- Η/Υ για την αποθήκευση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων



Εικόνα 12 Σταθμός τηλεμετρικής παρακολούθησης επιφανειακών νερών
(Evrotas River Monitoring Integration System-Internet Ermis I-
Ιούλιος 2004).

Στο σύστημα καταγραφής των ποιοτικών παραμέτρων του νερού ανά πάσα στιγμή μπορούν να προστεθούν αν δεν έχουν προβλεφθεί εξ' αρχής αισθητήρια μετεωρολογικών παραμέτρων (θερμοκρασία, υγρασία, άνεμος, ακτινοβολία, κτλ).

Τα αισθητήρια είναι ειδικά σχεδιασμένα για συνεχόμενη παραμονή στο νερό. Για την ακριβή λήψη μετρήσεων απαιτείται έλεγχος και βαθμονόμηση των αισθητηρίων μια φορά τον μήνα. Για την τοποθέτηση των αισθητηρίων και των ηλεκτρονικών συσκευών απαιτείται σταθερό σημείο στερέωσης.

Παρακάτω περιγράφονται τα επιμέρους τμήματα που μπορεί δυνητικά να διαθέτει ένας σταθμός μέτρησης ποιότητας επιφανειακών υδάτων.

2.1.3.1 Πολυκάναλος αισθητήρας

Ο πολυκάναλος αισθητήρας “data logger” μπορεί να μετρήσει τις φυσικές και χημικές παραμέτρους του νερού σε λίμνες. Οι μετρήσεις λαμβάνονται υπό πραγματικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Ο πολυκάναλος αισθητήρας διαθέτει ένα προεπιλεγμένο αριθμό διαφορικών καναλιών για την σύνδεση αισθητηρίων με αναλογική έξοδο (τάση, ρεύμα αντίσταση) έχει την δυνατότητα μέτρησης τάσης με διακριτική ικανότητα 1 μικροβόλτ και ακρίβεια στην περιοχή -20 °C έως 60 °C σε ποσοστό 0,2% . Μπορεί να δεχθεί επιπλέον διαφορικά κανάλια αναλογικής εισόδου, ή ψηφιακά κανάλια. Είναι δυνατόν να διαθέτει δυο ψηφιακά κανάλια για την σύνδεση ανάλογης εξόδου αισθητηρίων (βροχόμετρο, ανεμόμετρο). Επίσης συχνά διαθέτει δυο προγραμματισμένες εξόδους relay για την τροφοδοσία των αισθητηρίων αλλά και για έλεγχο εξωτερικών διατάξεων. Επιπρόσθετα διαθέτει ψηφιακή οθόνη υγρών κρυστάλλων και πληκτρολόγιο για την επιτόπου ένδειξη των μετρήσεων και για την διευκόλυνση διαδικασιών επιτόπου βαθμονόμησης των αισθητηρίων. Υπάρχει η δυνατότητα προγραμματισμού του ρυθμού λήψης μετρήσεων. Για κάθε σετ μετρήσεων είναι δυνατόν να καταγράφεται η ώρα και η ημερομηνία λήψης. Η μεταφορά των μετρήσεων μπορεί να γίνει μέσω φορητού υπολογιστή που να διαθέτει θύρα RS, ή μέσω γραμμής OTE (μέσω modem), ή μέσω κινητής τηλεφωνίας.

Στον πολυκάναλο αισθητήρα data logger μπορεί να προσαρτηθούν αισθητήρας μέτρησης οξυγόνου, συστοιχία μέτρησης της αγωγιμότητας και pH του νερού, αισθητήρας θερμοκρασίας του νερού, αισθητήρας μέτρησης μεταβολών στάθμης, αισθητήρας θολότητας νερού, αισθητήρας νιτρικών, αμμωνίας αμμωνίου κ.α. (Εικόνα 13).



Εικόνα 13 Αισθητήρας
μέτρησης παραμέτρων
των υδάτων

Οι αισθητήρες διατηρούν στην δική τους μνήμη τα δεδομένα βαθμονόμησης. Η χρήση smart sensors επιτρέπει την αλλαγή των αισθητηρίων πάνω στο όργανο, καθώς το όργανο επικοινωνεί ψηφιακά με τα αισθητήρια και όλα τα δεδομένα τους (βαθμονόμηση είδος παραμέτρου κτλ.) μεταβιβάζονται αυτόματα στο όργανο. Το όργανο μπορεί να έχει την δυνατότητα αυτόματης βαθμονόμησης με την χρήση ενός και μόνου διαλύματος για όλους τις παραμέτρους. Επίσης το όργανο μπορεί να προγραμματιστεί για την αυτόματη λήψη και καταγραφή μετρήσεων στην εσωτερική μνήμη με ρυθμό μέτρησης ελεύθερα καθοριζόμενο από τον χρήστη. Είναι δυνατή η καταγραφή 1.000.000 μετρήσεων σε διαφορετικά προγράμματα καταγραφής των μετρήσεων. Τα προγράμματα θα πρέπει να αποθηκεύονται στη μνήμη του οργάνου και ο χρήστης να έχει την δυνατότητα ενεργοποίησης του προγράμματος που είναι κατάλληλο ανάλογα με την τρέχουσα εφαρμογή. Ο προγραμματισμός της καταγραφής είναι γραμμικός, λογαριθμικός, γραμμικός μέσος όρος, συμβάντα. Κατά την λειτουργία του ως καταγραφικό δεν απαιτεί την φορητή μονάδα ανάγνωσης. Απλά το όργανο βυθίζεται στην επιθυμητή θέση και στην επιφάνεια παραμένει η άκρη του καλωδίου.

2.1.3.2 Επίγεια μονάδα ελέγχου

Ο κάθε σταθμός περιλαμβάνει προμήθεια και εγκατάσταση μιας πλήρους μονάδας ελέγχου με μεγάλη ψηφιακή οθόνη, ενσωματωμένο GSM modem και ενσωματωμένο λογισμικό για τηλεμετάδοση μετρήσεων συνοδευόμενη από τους ανάλογους αισθητήρες μέτρησης των κατάλληλων προεπιλεγμένων παραμέτρων της εκάστοτε εφαρμογής. Για όλες τις παραμέτρους προμηθεύεται και η εγκατάσταση του λογισμικού για οθονοποίηση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, την αποθήκευσή τους και την παρουσίασή τους σε ιστογράμματα και την αμφίδρομη επικοινωνία για ρυθμίσεις των αναλυτών από απομακρυσμένο Η/Υ.

2.1.3.3 Λογισμικό αισθητήρων

Το λογισμικό των αισθητήρων επιτρέπει την εμφάνιση στην οθόνη των παρακάτω λειτουργιών:

1. Το υπόλοιπο της μπαταρίας
2. Τον ελεύθερο χώρο αποθήκευσης δεδομένων
3. την ημερομηνία και το έτος
4. Τις μετρήσεις των δεδομένων

2.1.3.4 Λογισμικό Η/Υ

Το λογισμικό της σύνδεσης του Η/Υ είναι για διαθέσιμο για :

1. Την συγκέντρωση των δεδομένων, την αποθήκευση και την εκτύπωση
2. Την βαθμονόμηση των αισθητήρων
3. Την στατιστική επεξεργασία
4. Την μεταφορά των δεδομένων από το λογισμικό του αισθητήρα
5. Την ανάλυση των δεδομένων
6. Την δημιουργία γραφικών
7. Την διαχείριση του δικτύου

8. Την διαχείριση των θέσεων στα οποία είναι διασκορπισμένοι οι αισθητήρες

2.1.3.5 Εγκατάσταση

Η εγκατάσταση γίνεται σε σταθερό σημείο (κολώνα, τοιχίο μέσα ή πλησίον του λιμναίου συστήματος που θα τελεί υπό παρακολούθηση. Απαιτείται συνήθως μεταλλικό κυτίο στέγασης του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και της τροφοδοσίας, σωλήνας όδευσης αισθητηρίων, μικρός ιστός 3 μέτρων για την τοποθέτηση του ηλιακού συλλέκτη αν αυτός προβλέπεται σαν μέσο τροφοδοσίας. Μπορεί επίσης να γίνουν ειδικές κατασκευές με πλωτούς σταθμούς οι οποίες εμπεριέχουν δυσκολίες που αντιμετωπίζονται στο ύπαιθρο με κατάλληλους χειρισμούς (Ψιλοβίκος κ.α., 2002).

Η τροφοδοσία του σταθμού μπορεί να γίνει με ηλεκτρική ενέργεια ή με ηλιακή ενέργεια ή ακόμη και με την χρήση αλκαλικών μπαταριών.

Η Επικοινωνία του κάθε σταθμού για την μεταφορά των μετρήσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί:

- Με τηλεμετρική διάταξη για την επικοινωνία μέσω δικτύου GSM. Η διάταξη περιλαμβάνει μόντεμ κινητής τηλεφωνίας.
- Με τηλεμετρική διάταξη για επικοινωνία μέσω δικτύου ΟΤΕ
- Με επιτόπου καταγραφή μέσω computer

Η πολυμετρική συστηματική έρευνα μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, ως επιτόπια παρακολούθηση και ως εξ' αποστάσεως παρακολούθηση.

Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των ποιοτικών παραμέτρων σε λιμναία συστήματα συμβάλλει σε διαχειριστικές πρακτικές (Ψιλοβίκος, 2005).

- Διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας των οικοσυστημάτων και των υδατικών πόρων της περιοχής
- έλεγχος ποιότητας νερού για άρδευση

- έλεγχος των ατμοσφαιρικών συνθηκών και προσδιορισμός μικροκλιματικών δεικτών
- έγκαιρη προειδοποίηση και άμεση λήψη αποφάσεων σε περιπτώσεις κρίσεων, οι οποίες προκαλούνται από ακραία φαινόμενα
- Την άμεση και συνεχή γνώση της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το λιμναίο περιβάλλον

Με την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση είναι δυνατή η συστηματική παρακολούθηση των ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων επιφανειακών και υπόγειων νερών με την οποία δημιουργούνται χρονοσειρές, οι τιμές των οποίων χρησιμοποιούνται για την δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης με σκοπό την εφαρμογή διαχειριστικών πρακτικών.

2.1.4 Νεώτερες τεχνικές on-line μέτρησης

2.1.4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί τεχνικές για τη συνεχή μέτρηση της ποιότητας του νερού ή των αποβλήτων που ξεφεύγουν από τις κλασσικές ηλεκτροχημικές ή χρωματομετρικές μεθόδους. Έχουν αναπτυχθεί νέου τύπου αισθητήρες, που είναι στην ουσία φασματοφωτόμετρα τα οποία έρχονται κατευθείαν σε επαφή με το δείγμα, έχουν μικρούς χρόνους απόκρισης, πραγματοποιούν μεγάλο αριθμό μετρήσεων, δεν χρησιμοποιούν χημικά αντιδραστήρια και δεν απαιτούν προετοιμασία του δείγματος. Έχουν εφαρμογή στη μέτρηση του οργανικού φορτίου και των νιτρικών ιόντων.

Πρόσφατα έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται και η μέτρηση της τοξικότητας σε αναλυτές συνεχούς μέτρησης. Σαν δείκτες χρησιμοποιούνται *Daphnia* ή μικροοργανισμοί που εκπέμπουν φωταύγεια. Τα όργανα είναι αρκετά σύνθετα, αλλά έχουν ευαισθησία σε μικρές συγκεντρώσεις ρυπαντών, που δύσκολα ανιχνεύονται σε

αναλυτές συνεχούς μέτρησης. Στην συνέχεια γίνεται μια σύντομη παρουσίαση αυτών των τεχνικών.

2.1.4.2 Οργανικό φορτίο

Το οργανικό φορτίο εκφράζεται ως COD, BOD ή TOC. Για τη συνεχή μέτρηση των παραμέτρων αυτών χρησιμοποιούνται αφενός on-line αναλυτές, η τεχνική των οποίων μπορεί να θεωρηθεί σαν μια αυτοματοποίηση των παραδοσιακών εργαστηριακών μεθόδων δειγματοληψίας και ανάλυσης και αφετέρου αισθητήρες συνεχούς λειτουργίας οι οποίοι τοποθετούνται απευθείας στο προς μέτρηση μέσο. Η λειτουργία των αισθητήρων αυτών στηρίζεται στην μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης στα 254 nm και το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι για τη λειτουργία τους δεν απαιτείται δειγματοληψία και χημικά αντιδραστήρια ή άλλα αναλώσιμα.

2.1.4.3 Τοξικότητα

Η αρχή λειτουργίας των μεθόδων μέτρησης της τοξικότητας με τη χρήση βακτηρίων που εκπέμπουν βιοφωταύγεια, βασίζεται στην εκπομπή φωτός από αυτά τα βακτήρια όταν βρίσκονται σε κατάλληλο καθαρό περιβάλλον. Οι τοξικές ουσίες επηρεάζουν τις κυτταρικές δομές οι οποίες είναι θεμελιώδεις για όλους τους ζωντανούς οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου. Η βιοφωταύγεια έχει άμεση σχέση με τη ζωτικότητα, δηλαδή τη μεταβολική κατάσταση του κυττάρου. Κάθε τοξική ουσία μπορεί να προκαλέσει αλλαγές σε κυτταρικό επίπεδο όπως η κυτταρική μεμβράνη, το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρονίων, το περιεχόμενο του πρωτοπλάσματος κλπ. τα οποία έχουν άμεση αντανάκλαση στη μείωση της βιοφωταύγειας.

Οι μετρήσεις της τοξικότητας με φορητά, εργαστηριακά ή όργανα συνεχούς μέτρησης έχουν μεγάλο πεδίο εφαρμογής. Είναι κατάλληλες για την παρακολούθηση

επιφανειακών και υπόγειων νερών, υγρών αποβλήτων, για τον έλεγχο χημικών παρασκευασμάτων στην βιομηχανία κλπ.

2.1.5 Δορυφορική παρακολούθηση με χρήση της τηλεπισκόπησης

2.1.5.1 Εισαγωγή

Η παρακολούθηση της ποιότητας νερού βασίζεται στις συγκεντρώσεις των διαφόρων διαλυμένων ουσιών σε κάποιους συγκεκριμένους σταθμούς οι οποίες προσδιορίζονται με την δειγματοληψία και την ανάλυση του νερού στο εργαστήριο. Για μια αποδοτική διαχείριση των επιφανειακών νερών επίσης απαιτούνται πληροφορίες σχετικά με την χωρική διασπορά και την χρονική διακύμανση αυτών των συγκεντρώσεων. Η τοποθέτηση αισθητηρίων με τα οποία επιτυγχάνεται η εξ' αποστάσεως καταμέτρηση μια σειράς παραμέτρων είναι για πολλές περιπτώσεις η μόνη τεχνική για την παρατήρηση και παρακολούθηση των χωρικών διακυμάνσεων της ποιότητας νερού (Heinonen, Ziglio & Van der Beken, 2000).

Η παρακολούθηση με τηλεμετρικά συστήματα μπορεί να καταμετρήσει μια σειρά φυσικοχημικών παραμέτρων στα επιφανειακά στρώματα του νερού, όμως δεν έχει την δυνατότητα να καταμετρήσει το διαλυμένο οξυγόνο στο υπολίμνιο, τοξικές ουσίες αλλά και οξύτητα. Όμως οι παράμετροι που μπορεί να προσδιοριστούν όπως η χλωροφύλλη-α, τα διαλυμένα στερεά, η θολότητα, η διαπερατότητα, κ.α μπορούν να διαδραματίσουν ένα σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση της οικολογικής κατάστασης μιας λίμνης.

2.1.5.2 Αρχές του συστήματος τηλεπισκόπησης στην παρακολούθηση της ποιότητας νερού

Η παρακολούθηση της ποιότητας νερού με τα συστήματα τηλεπισκόπησης βασίζεται στην χρήση εμβαπτισμένων αισθητήρων που λειτουργούν στο ορατό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και σε μήκος κύματος από 380-760 nm. Επιπρόσθετα η

θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί με αισθητήρα υπέρυθρων ακτινών (3-30μm). Θερμοκρασιακοί χάρτες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση υδροδυναμικών φαινομένων σημαντικών για τα υδάτινα οικοσυστήματα, όπως αναδύσεις νερών και θερμική στρωμάτωση.

Ένας αισθητήρας αποτελείται από ένα σπεκτρόμετρο το οποίο μετρά την αναδύμενη ακτινοβολία του υδάτινου σώματος σε διάφορες αναλογίες μηκών κύματος. Για να μπορούν οι μετρήσεις να γίνουν κάτω από διαφορετικές συνθήκες φωτεινότητας, η καταμέτρηση συχνά μετασχηματίζεται σε ανάκλαση.

2.1.5.2.1 Συστατικά τα οποία ενεργούν οπτικά

Η άμεση και διάχυτη ακτινοβολία η οποία εισχωρεί στην υδάτινη στήλη απορροφάται και διασκορπίζεται από το ίδιο το νερό και από άλλες επίσης ουσίες οι οποίες δρουν οπτικά. Η αξιολόγηση της ποιότητας του νερού βασίζεται στις διαφορές του μεγέθους και του σχήματος της φασματικής ανάκλασης, η οποία επηρεάζεται από τα οπτικά χαρακτηριστικά και τις συγκεντρώσεις των ουσιών στο νερό.

2.1.5.2.2 Αισθητήρες τηλεπισκόπησης

Αυτοί οι αισθητήρες φέρουν φασματοακτινόμετρα, τα οποία τοποθετούνται επί σταθερών σημείων και χρησιμοποιούνται για να κάνουν σημειακές και κάθετες μετρήσεις. Συχνά χαρακτηρίζονται από την φασματική, χωρική και χρονική ανάλυση. Η χωρική ανάλυση προσδιορίζει το πλάτος και το μήκος κύματος των καναλιών και επιπρόσθετα προσδιορίζει ποιος τύπος αισθητήρα μπορεί να εφαρμοστεί. Η χωρική ανάλυση των δορυφορικών αισθητήρων συχνά διαφέρει μεταξύ 10-1000m. Μια ανάλυση της τάξης των 100m σημαίνει ότι η ποιότητα νερού σε ένα εικονοστοιχείο (pixel) των 100X100 m μπορεί να προσδιοριστεί. Εάν το εικονοστοιχείο περιλαμβάνει χερσαίες περιοχές ή νησιά, το τηλεμετρικό σήμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ποιότητας νερού.

Η χρονική ανάλυση προσδιορίζεται από τον χρόνο επανεπίσκεψης του αισθητήρα και δηλώνει πόσο συχνά μια εικόνα της ίδιας περιοχής μπορεί να επιτευχθεί. Η τηλεπισκόπηση με τους δορυφόρους δεν μπορεί να δεν είναι δυνατή σε συνθήκες συννεφιάς .

2.1.5.3 Λιμνολογικές και τοπικές μετρήσεις

2.1.5.3.1 Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία απαιτεί να βαθμονομηθεί και να γίνει έλεγχος της αξιοπιστίας με την ερμηνεία των αλγορίθμων των δεδομένων της τηλεπισκόπησης. Τα παρακάτω στοιχεία είναι ιδιαίτερα σημαντικά :

- Οι επιλεγμένοι σταθμοί θα πρέπει να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων
- Η δειγματοληψία θα πρέπει να πραγματοποιείται κατά την ίδια μέρα
- Δειγματοληψία σε βάθη 0-0,5 είναι συνήθως ικανοποιητικές
- Η ανταπόκριση της ακριβούς ώρας και των συντεταγμένων από ένα δέκτη διαφορικής παγκόσμιας θέσης (DGPS)
- Η εσωτερική βαθμονόμηση των αναλύσεων και των οργάνων, εάν αρκετά εργαστήρια και πεδία οργάνων έχουν περιληφθεί.

2.1.5.3.2 Η υλοποίηση προγράμματος τηλεπισκόπησης στην λίμνη

Η παρακολούθηση λιμναίων οικοσυστημάτων με την μέθοδο της τηλεπισκόπησης δεν έχει ακόμα εφαρμοστεί, παρά μόνο σε προσδιορισμό του βάθους του πυθμένα, όπως στην περίπτωση της λιμνοθάλασσας του Μεσολογγίου (Αλμπανάκης κ.α., 2004). Στο άμεσο μέλλον δορυφορικοί αισθητήρες όπως οι ENVISAT MERIS που είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για την τηλεπισκόπηση παράκτιων περιοχών και λιμναίων οικοσυστημάτων.

Περισσότερη δουλειά χρειάζεται στην ανάπτυξη της ερμηνείας με αλγόριθμους. Καθώς οι τεχνικές τηλεπισκόπησης αναπτύσσονται και οι εικόνες είναι εύκολα διαθέσιμες το σύστημα τηλεπισκόπησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των λιμναίων οικοσυστημάτων με τους ακόλουθους τρόπους:

- Η παρακολούθηση με τηλεπισκόπηση είναι η μόνη μέθοδος η οποία είναι ικανή να παρουσιάσει χωρικά την ποιοτική διαφοροποίηση του νερού της λίμνης.
- Έχει την δυνατότητα μαζικής παρακολούθησης λιμνών αλλά και την εκτίμηση της ποιότητας της καθεμιάς χωριστά. Όταν οποιαδήποτε οικολογική αναταραχή εντοπιστεί μπορεί στην συνέχεια να λάβει χώρα η παραδοσιακή δειγματοληψία.
- Εφόσον η παρακολούθηση με τηλεπισκόπηση προμηθεύει πληροφόρηση για την χωρική διασπορά της ποιότητας του νερού, οι θέσεις σταθμών δειγματοληψίας που χρησιμοποιούνται στο απλό σύστημα παρακολούθησης μπορούν να βελτιστοποιηθούν. Τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό των καταλληλότερων θέσεων δειγματοληψίας.
- Η θολερότητα και η υψηλή συγκέντρωση των αιωρούμενων μπορεί να ερμηνευτούν άμεσα από τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση εισερχόμενων ρυπογόνων ουσιών, αλλά και για την εκτίμηση των θρεπτικών.

Η χρήση της παρακολούθησης με τηλεπισκόπηση είναι αποτελεσματική γιατί παρέχει εύκολα χάρτες και εικόνες που μπορούν να ερμηνευτούν απλά. Επιπρόσθετα και άλλα συστήματα όπως το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) μπορεί να υποστηρίξει αυτές τις εικόνες και να τις ερμηνεύσει ποσοτικά. Αυτό για να είναι

δυνατό να πραγματοποιηθεί, είναι αναγκαία η θέση των σημείων δειγματοληψίας, οι συγκεντρώσεις των ουσιών, πληροφόρηση της ακτογραμμής και βυθομετρικά δεδομένα.

2.1.6 Παρακολούθηση σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60 Ε.Ε

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον της εθνικής και ευρωπαϊκής νομοθεσίας έχει στραφεί στον έλεγχο της ποιότητας του νερού. Η διαρκής υποβάθμιση και η έλλειψη που παρατηρείται έχει οδηγήσει τις αρχές στον έλεγχο της ποιότητας του νερού, της προστασίας των αποθεμάτων και της ανακύκλωσης στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό.

Τα επιφανειακά και υπόγεια νερά βρίσκονται υπό πίεση, με κινδύνους υποβάθμισης της ποιότητάς τους, κατά συνέπεια η αναγκαιότητα, σε πρώτη φάση, της παρακολούθησης τους – ποιοτικής και ποσοτικής- να καθιστάται επιτακτική. Στο πνεύμα των παραπάνω η Ευρωπαϊκή ένωση θέσπισε την Οδηγία 2000/60 που αποτελεί μια ολιστική και καινοτόμο προσπάθεια προστασίας και διαχείρισης των υδατικών σωμάτων (επιφανειακών, μεταβατικών, παράκτιων και υπόγειων) ώστε:

- Να αποτρέπεται η περαιτέρω υποβάθμιση των υδάτων και να προστατεύονται και βελτιώνονται οι υδατικοί πόροι.
- Να προωθείται η βιώσιμη διαχείριση των υδάτων, μέσω της μακροπρόθεσμης προστασίας των υδατικών πόρων.
- Να υποβοηθείται η βελτίωση του υδάτινου περιβάλλοντος μέσω εφαρμογής συγκεκριμένων μέτρων για τη σταδιακή μείωση της απόρριψης τοξικών ρυπαντικών ουσιών προτεραιότητας της εξάλειψής τους.
- Να εξασφαλίζεται η προοδευτική μείωση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων και να αποτρέπεται η περαιτέρω ρύπανση τους.

- Να υποβοηθείται η αντιμετώπιση των επιπτώσεων ακραίων φαινομένων πλημμύρων και ξηρασίας

Ο βασικός στόχος της Οδηγίας είναι η επίτευξη καλής ποιότητας υδάτων για όλα τα υδάτινα σώματα (ποτάμια, λίμνες, ενδιάμεσα, παράκτια, υδατοκαλλιέργειες, υπόγεια, τεχνητά ύδατα τροποποιημένα σε μεγάλο βαθμό) μέχρι το 2015. Το χρονοδιάγραμμα επίτευξης του τελικού στόχου, που πρέπει να υλοποιηθεί από τα κράτη μέλη, επιμερίζεται με αναφορά σε ενδιάμεσα στάδια, μεταξύ των οποίων προβλέπεται η θέση και λειτουργία Προγραμμάτων παρακολούθησης της κατάστασης των υδάτων με χρονικό ορίζοντα 2006.

Η νέα θεώρηση της οδηγίας πλαίσιο είναι η ολοκληρωμένη προσέγγιση της προστασίας των υδατικών πόρων με την διαχείριση ανά λεκάνη ή ομάδα λεκανών, με την ενιαία θεώρηση όλων των τύπων υδατικών συστημάτων και τον πλήρη σχεδιασμό και την υλοποίηση προγραμμάτων διαχείρισης (Greek Parliament 2001b).

Τα συστήματα επιφανειακών υδάτων εντός της Περιοχής Λεκάνης Απορροής Ποταμού κατατάσσονται σε:

- Φυσικά συστήματα (ποταμοί, λίμνες, μεταβατικά ύδατα ή παράκτια ύδατα)
- Τεχνητά ή ιδιαιτέρως τροποποιημένα υδατικά συστήματα.

Η διαχειριστική προσέγγιση της οδηγίας στοχεύει στην ολοκληρωμένη υδατική διαχείριση σε επίπεδο λεκάνης ποταμού και στην διασφάλιση του πλήρους συντονισμού της υδατικής πολιτικής σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Υπό την έννοια του Νομικού Πλαισίου, η Οδηγία επικεντρώνεται στην εγκατάσταση των σωστών συνθηκών που ενθαρρύνουν την ικανοποιητική και αποτελεσματική προστασία των υδάτων σε τοπικό επίπεδο, με την εισαγωγή εργαλείων για μια κοινή προσέγγιση, κοινούς στόχους, αρχές, ορισμούς και βασικά μέτρα. Όμως οι μηχανισμοί και τα ειδικά μέτρα που απαιτούνται για την επίτευξη της

καλής κατάστασης των υδάτων, λαμβάνονται σε τοπικό επίπεδο και είναι ευθύνη των αρμοδίων (εθνικών, τοπικών ή σε επίπεδο λεκάνης απορροής) αρχών.

Η εφαρμογή της Οδηγίας οδηγεί στην ορθή προστασία και χρήση των υδάτων, στην μείωση του κόστους επεξεργασίας, την εκτίμηση της αξίας των επιφανειακών υδάτων και σε μια κατά πολύ περισσότερο συντονισμένη διοίκηση και διαχείριση των υδάτων.

Ο απώτερος σκοπός είναι η διασφάλιση της αειφόρου χρήσης των υδάτων. Η Οδηγία ήταν επομένως απαραίτητη, καθώς οι κοινοτικές νομοθεσίες που αναπτύχθηκαν τα τελευταία 25 χρόνια ήταν αποσπασματικές, συχνά χωρίς συνοχή μεταξύ τους και χωρίς σχεδιασμό επί της αειφορίας, αλλά κυρίως επικεντρωμένες στον έλεγχο της ρύπανσης ή μερικών ρυπαντών (Ψιλοβίκος, 2005).

Η παρακολούθηση **“monitoring”** ορίζεται ως η προγραμματισμένη διαδικασία της δειγματοληψίας και των μετρήσεων και στην συνέχεια της καταγραφής ή τηλεμετάδοσης ή και των δυο, διαφόρων χαρακτηριστικών του νερού με στόχο την αποτίμηση της κατάστασης και της συμμόρφωσης σε συγκεκριμένους μακροπρόθεσμους αντικειμενικούς στόχους.

Τα κράτη μέλη οφείλουν:

- Να διεξάγουν διαφόρων τύπων παρακολούθηση της κατάστασης των υδάτων τους και να πληροφορήσουν την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τις διαδικασίες της παρακολούθησης και τα αποτελέσματα 3 μήνες μετά την ολοκλήρωση του πρώτου σχεδίου Διαχείρισης Περιοχών Λεκάνης Απορροής (μέχρι το 2010).
- Να υποβάλλουν μια ενδιάμεση αναφορά περιγραφής της προόδου της εφαρμογής του σχεδιασθέντος προγράμματος μέτρων εντός τριών ετών από την δημοσίευση του πρώτου σχεδίου Διαχείρισης Περιοχών Λεκάνης Απορροής (μέχρι το 2012) και ακολούθως μετά τις αναθεωρήσεις του.

Τα κράτη – μέλη οφείλουν:

- Να αναθεωρήσουν το πρώτο σχέδιο Διαχείρισης Περιοχών Λεκάνης Απορροής μέχρι το 2015 και στην συνέχεια κάθε έξι χρόνια. Επιπλέον, το πρόγραμμα μέτρων προβλέπει μηχανισμούς προσδιορισμού της αναγκαιότητας για την ανάληψη περαιτέρω δράσεων σε υψηλότερο επίπεδο.
- Ως κατάσταση επιφανειακών υδάτων ορίζεται το σύνολο της οικολογικής και χημικής τους κατάστασης συγκεκριμένα:
 - I. Οικολογική κατάσταση είναι το μέτρο της ποιότητας της δομής και λειτουργίας των υδατικών οικοσυστημάτων που συνδέονται με τα επιφανειακά ύδατα, στην βάση ενός συνδυασμού βιολογικών, υδρομορφολογικών και φυσικοχημικών στοιχείων.
 - II. Χημική κατάσταση είναι το μέτρο της ρύπανσης.

2.1.6.1 Μηχανισμοί και συχνότητα παρακολούθησης

Γενικά, υπάρχουν τρεις τύποι προγραμμάτων παρακολούθησης:

- 1) Τα γενικής φύσεως προγράμματα **εποπτικής παρακολούθησης** των υδατικών συστημάτων που έχουν σκοπό την εκτίμηση της κατάστασης του υδατικού συστήματος. Ειδικότερα, τα προγράμματα αυτά λειτουργούν ως εργαλείο συλλογής πληροφοριών αναφορικά με την εκτίμηση των μακροπρόθεσμων μεταβολών των φυσικών συνθηκών καθώς και των μεταβολών που προκύπτουν από διαδεδομένες ανθρώπινες δραστηριότητες. Στο πλαίσιο της εποπτικής παρακολούθησης, τα κράτη μέλη θα πρέπει να παρακολουθούν για μια περίοδο, τουλάχιστον ενός έτους, όλες τις ενδεικτικές παραμέτρους όλων των βιολογικών, υδρομορφολογικών, και γενικών φυσικοχημικών ποιοτικών στοιχείων καθώς επίσης και όλους τους ρύπους που απορρίπτονται στη λεκάνη

απορροής ποταμού και περιλαμβάνονται στον κατάλογο ουσιών προτεραιότητας.

- 2) Σκοπός της εκπόνησης προγραμμάτων **επιχειρησιακής παρακολούθησης** είναι η επαλήθευση ή επιβεβαίωση της κατάστασης των υδατικών συστημάτων που κινδυνεύουν να μην επιτύχουν τους περιβαλλοντικούς τους στόχους και η αξιολόγηση οποιωνδήποτε μεταβολών στην κατάσταση των συστημάτων αυτών που προκύπτουν από την εφαρμογή των προγραμμάτων μέτρων. Στην επιχειρησιακή παρακολούθηση, θα πρέπει να παρακολουθούνται μόνο οι ενδεικτικές παράμετροι εκείνων των βιολογικών, υδρομορφολογικών και φυσικοχημικών ποιοτικών στοιχείων που εμφανίζουν ευαισθησία στις πιέσεις οι οποίες ασκούνται στο υδατικό σύστημα καθώς και όλες οι ουσίες προτεραιότητας και άλλες ουσίες που απορρίπτονται σε σημαντικές ποσότητες.
- 3) Σε εξαιρετικές περιπτώσεις, μπορεί να απαιτείται ο σχεδιασμός προγραμμάτων **διερευνητικής παρακολούθησης**. Διερευνητική παρακολούθηση διενεργείται όταν είναι άγνωστες οι αιτίες για τις οποίες ένα ή περισσότερα υδατικά συστήματα δεν μπορούν να επιτύχουν τους περιβαλλοντικούς τους στόχους και για την εξακρίβωση του μεγέθους και των επιπτώσεων ρύπανσης οφειλόμενης σε ατύχημα.

Ενώ ο γενικός αντικειμενικός σκοπός της εφαρμογής των προγραμμάτων παρακολούθησης της Οδηγίας πλαίσιο για τα Ύδατα είναι σαφώς καθορισμένος, οι ειδικοί σκοποί παρακολούθησης μεταβάλλονται εξαρτώμενοι από τον τρόπο παρακολούθησης που επιλέγεται κάθε φορά, π.χ. εποπτική, επιχειρησιακή ή διερευνητική παρακολούθηση (European Community, 2000).

Οι συχνότητες παρακολούθησης δεν προσδιορίζονται με ακρίβεια στο κείμενο της Οδηγίας, διότι κάποια ποιοτικά στοιχεία μπορεί να εμφανίζουν μεγάλη ή

μικρότερη μεταβλητότητα σε σχέση με άλλα. Όσα εμφανίζουν μεγάλη μεταβλητότητα απαιτούν και υψηλότερες συχνότητες δειγματοληψιών (άρα μεγαλύτερο κόστος) από όσα είναι σταθερά ή προβλέψιμα. Η Οδηγία επιτρέπει στα Κράτη μέλη να προσαρμόσουν τις συχνότητες παρακολούθησης σύμφωνα με τις διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στα δικά τους ύδατα. Ωστόσο, το βασικό είναι να διασφαλίζεται αξιοπιστία στην εκτίμηση της κατάστασης όλων των υδατικών συστημάτων.

Ειδικά για την παρακολούθηση των λιμνών που είναι μέρος των επιφανειακών νερών, ακολουθούνται τα παρακάτω:

1.Με εποπτική παρακολούθηση

- τις ενδεικτικές παραμέτρους όλων των βιολογικών, υδρομορφολογικών και γενικών φυσικοχημικών στοιχείων ποιότητας
- κατάλογο προτεραιότητας ουσιών εάν εναποτίθονται σε λεκάνες ποταμών
- άλλες μολυσματικές ουσίες εάν εναποτίθονται σε σημαντικές ποσότητες

2. Με επιχειρησιακή παρακολούθηση

Οι ενδεικτικές παράμετροι των βιολογικών και υδρομορφολογικών στοιχείων ποιότητας που είναι περισσότερο ευαίσθητοι στις πιέσεις στις οποίες οι μάζες υποβάλλονται μόνον ουσίες που έχουν προτεραιότητα και άλλα μολύσματα συμπεριλαμβανομένων και των θρεπτικών στοιχείων τα οποία μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα ένταξης στην Κοινοτική Οδηγία.

2.1.6.2 Συχνότητα δειγματοληψίας και συνθήκες αναφοράς.

Η συχνότητα δειγματοληψίας για την εποπτική και την διαχειριστική παρακολούθηση θα πρέπει να καθοριστεί στα πλαίσια ορίων εμπιστοσύνης. Ίσως εκεί όπου δεν υπάρχουν δεδομένα να αναλαμβάνεται η υποχρέωση επιπρόσθετης

εποπτικής παρακολούθησης κατά την χρονική περίοδο 2006-2008. Περισσότερα δεδομένα απαιτούνται να συγκεντρωθούν και να αποκτηθούν.

Η Οδηγία πλαίσιο υιοθετεί την έννοια των συνθηκών αναφοράς και προβλέπει ότι η αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης των υδάτινων συστημάτων θα γίνονται μέσω σύγκρισης με συνθήκες αναφοράς. Μόνο αφού καθοριστούν οι συνθήκες αναφοράς είναι δυνατόν να δημιουργηθούν κριτήρια και τα όρια των κλάσεων ποιότητας που προβλέπονται από την Οδηγία ώστε να καταστεί δυνατή η ταξινόμηση των υδάτινων σωμάτων σε κατηγορίες οικολογικής κατάστασης.

Η παρακολούθηση διενεργείται προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος και οι επιπτώσεις όλων των σημαντικών πιέσεων στα συστήματα αυτά και όπου αυτό χρειάζεται, προκειμένου να αξιολογηθούν οι μεταβολές στην κατάσταση των συστημάτων αυτών οι οποίες οφείλονται στα προγράμματα μέτρων. Η παρακολούθηση συνεχίζεται μέχρις ότου οι περιοχές καλύψουν τις σχετικές με τα ύδατα απαιτήσεις της νομοθεσίας βάσει της οποίας έχουν οριστεί και ανταποκριθούν στους στόχους.

Ποιοτικά στοιχεία για την εκτίμηση της οικολογικής ποιότητας σε ποταμούς – λίμνες δίνονται στον **πίνακα 2**.

Πίνακας 2 Ποιοτικά στοιχεία εκτίμησης της οικολογικής ποιότητας

Βιολογικά στοιχεία	Αβιοτικά στοιχεία (που υποστηρίζουν τα βιολογικά)
Φυτοπλαγκτόν	Υδρομορφολογικά στοιχεία
Μακρόφυτα (φυτοβένθος)	Υδρολογικό καθεστώς
Βενθικά ασπόνδυλα	Συνέχεια (μόνο στην περίπτωση ποταμών)
Ψάρια	Μορφολογικές συνθήκες
	Χημικά & φυσικοχημικά στοιχεία
	Γενικά (θερμοκρασία, οξυγόνωση, κλπ)
	Συγκεκριμένοι ρύποι

Ειδικότερα τα ποιοτικά στοιχεία διακρίνονται σε:

- **Βιολογικά :** ψάρια, βενθικά μακροασπόνδυλα, υδατική χλωρίδα
- **Υδρομορφολογικά:** Υδρολογικό καθεστώς (ποσότητα & δυναμική της ροής, σύνδεση με τα υπόγεια νερά), συνέχεια του ποταμού (μόνο στην περίπτωση ποταμού), βάθος και πλάτος, δομή της παρόχθιας βλάστησης
- **Φυσικοχημικά:** συνθήκες θερμοκρασίας και οξυγόνου, αλατότητα, θρεπτικά, ουσίες προτεραιότητας, άλλοι ρυπαντές που εισέρχονται σε σημαντικές ποσότητες.

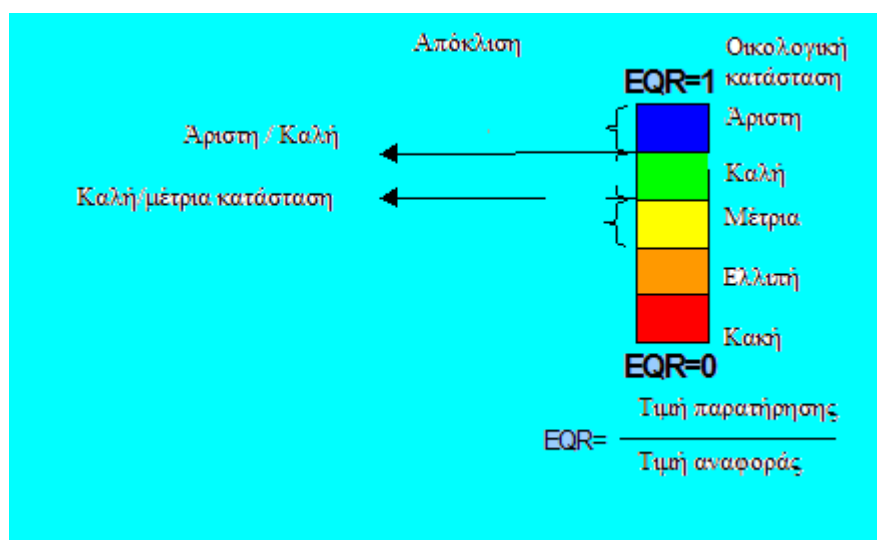
Τα αποτελέσματα θα παρουσιάζονται σε χάρτες για κάθε τομέα Λεκάνης Απορροής με χρωματική διαβάθμιση για τα πέντε επίπεδα ποιοτικής κατάστασης (Άριστη, Καλή, Μέτρια, Ελλιπής, Κακή).

2.1.6.3 Ταξινόμηση λιμναίων συστημάτων σε κατηγορίες ποιότητας

Μετά τον καθορισμό των τύπων των υδάτινων σωμάτων και συνθηκών αναφοράς για κάθε τύπο είναι δυνατό να καθοριστούν τα όρια μεταξύ των κατηγοριών ποιότητας.

Η ταξινόμηση ενός τύπου υδάτινου σώματος από πλευράς οικολογικής ποιότητας γίνεται μέσω της σύγκρισης των τιμών που παρατηρούνται (monitoring) με τις τιμές αναφοράς του τύπου αυτού.

Η απόκλιση που παρουσιάζει ένα υδάτινο σώμα από τις Συνθήκες Αναφοράς χαρακτηρίζεται από το λόγο μεταξύ της τιμής που αντιστοιχεί στις Συνθήκες Αναφοράς προς τη τιμή που παρουσιάζει το υπό εξέταση υδάτινο σύστημα. Ο λόγος αυτός ονομάζεται Λόγος Οικολογικής Ποιότητας (EQR). Στο επόμενο περιγράφεται η κατηγοριοποίηση της οικολογικής ποιότητας σύμφωνα με τον λόγο της οικολογικής ποιότητας EQR Εικόνα 14 .



Εικόνα 14 Κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τον λόγο οικολογικής ποιότητας.

Καθώς τα κράτη μέλη οφείλουν να φέρουν όλα τα νερά σε μια οικολογική κατάσταση είναι προφανές ότι το μεγαλύτερο βάρος θα δοθεί στον προσδιορισμό των ορίων μεταξύ υψηλής-καλής- μέτριας οικολογικής κατάστασης. Ιδιαίτερα τα όρια

μεταξύ καλής και μέτριας οικολογικής κατάστασης θα σηματοδοτήσουν στο προσεχές μέλλον τη διαχείριση των νερών σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο.

Συμπερασματικά η οικολογική ταξινόμηση προκύπτει από τα βιολογικά, χημικά και φυσικοχημικά στοιχεία. Αν τα βιολογικά στοιχεία δεν παρουσιάζουν επαρκή ευαισθησία στις εκάστοτε πιέσεις τότε αναπληρώνονται από τα χημικά και φυσικοχημικά στοιχεία. Τα υδρομορφολογικά στοιχεία εφαρμόζονται μόνο στον καθορισμό των θέσεων αναφοράς και όχι στην ταξινόμηση.

Συνοπτικά για τα λιμναία νερά είναι αναγκαίο να ελέγχονται :

- Η ποιότητα των νερών και το μέγεθος της ρύπανσής
- Η ύπαρξη ευτροφισμού και το μέγεθος του εάν αυτός παρατηρείται
- Η υδρολογία της -ισοζύγιο νερού
- Η οικολογία του φυτοπλαγκτού των λιμνών

2.1.7 Τύποι ταξινόμησης της οικολογικής κατάστασης των λιμνών

Υπάρχουν πολλοί τύποι ταξινόμησης της οικολογικής κατάστασης των λιμνών κάποιοι παρουσιάζονται σχηματικά στον πίνακα 3. Ως γενικός κανόνας μπορεί να θεωρηθεί ότι λίμνες με συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου μικρότερες από 10 $\mu\text{g/l}$ είναι ολιγοτροφικές και λίμνες με ολικό φώσφορο πάνω από 100 $\mu\text{g/l}$ είναι υπερτροφικές (USEPA 2000). Ο Carvalho et al. (2002) παρουσίασε ένα απλό τύπο ταξινόμησης, το οποίο έχει αναπτυχθεί στην Ευρώπη πίνακας 4. Τα κριτήρια τα οποία χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της κατάστασης του ευτροφισμού στις λίμνες στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης φαίνονται στον πίνακα 5. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούμε τα κριτήρια που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.

Ο πιο αποδεκτός τύπος ταξινόμησης έχει αναπτυχθεί από τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) ή όπως αναφέρεται στην ξένη

βιβλιογραφία Organization for Economic Co-operation and Development (OECD 1982).

Πίνακας 3 Περιληπτικά οι πιο διαδεδομένοι τύποι ταξινόμησης της οικολογικής κατάστασης των λιμνών

Τροφική κατάσταση λιμνών								
Μεταβλητή	Υπερ-ολιγοτροφική	Ολιγοτροφική	Ολιγο-μεσοτροφική	Μεσοτροφική	Μεσο-ευτροφική	Ευτροφική	Υπερ-ευτροφική	Αναφορά
Ολικός φώσφορος (μg/l)	-	<10	-	10-35	-	35-100	>100	OECD 1982
	<4	4-10	-	10-20	20-35	35-100	>100	CCME 2004
	-	<10	-	10-20	-	>20	-	Thomann and Mueller 1987
	-	<5	-	10-30	-	-	>100	Chambers et al 2001
	<5	-	5-10	-	10-30	30-100	>100	Wetzel 1983
	-	<10	-	10-30	-	-	>100	Nurnberg 1996
Χλωροφύλλη-α	-	<2,5	-	2,5-8	-	8-25	>25	OECD 1982
	-	<4	-	4-10	-	>10	-	Thomann and Mueller 1987
	0,01-0,5	0,3-3	-	2-15	-	10-500	-	Wetzel 1983
	-	<3,5	-	3,5-9	-	9,1-25	>25	Nurnberg 1996
Διαφάνεια (m)	-	>6	-	3-6	-	<1,5	-	OECD 1982
	-	>4	-	2-4	-	<2	-	Thomann and Mueller 1987
	-	>4	-	2-4	-	1-2,1	<1	Nurnberg 1996
TN (μg/l)	-	<350	-	350-650	-	651-1,200	>1,200	Nurnberg 1996
	< 1-250	-	250-600	-	500-1,100	-	500- >15,000	Wetzel 1983
Ανόργανο άζωτο (μg/l)	<200	-	200-400	-	300-650	500-1,500	>1,500	Wetzel 1983
Οργανικό άζωτο (μg/l)	<200	-	200-400	-	400-700	700-1,200	>1,200	Wetzel 1983
Οξυγόνο κορεσμού στο υπολίμνιο %	-	>80	-	10-80	-	<10	-	Thomann and Mueller 1987
TOC (Total organic carbon) Ολικός οργανικός άνθρακας (mg/l)	-	<1-3	-	<1-5	-	5-30	-	Wetzel 1983
DOC (Dissolved organic carbon (mg/l)	-	2	-	3	-	10	-	Kalff 2002

Πίνακας 4: Ένας κοινός τύπος ταξινόμησης για τις Ευρωπαϊκές λίμνες
(Carvalho et al.2002)

Παράμετρος	Μονάδες	Κατάσταση				
		Άριστη	Καλή	Μέτρια	Φτωχή	Κακή
TP (μέσος όρος)	(μg/l)	Αδιατάραχτα επίπεδα	<125% της άριστης κατάστασης	125-150% της άριστης κατάστασης	150-200% της άριστης κατάστασης	20% της άριστης κατάστασης
Χλωροφύλλη-α (μέσος όρος)	(μg/l)	<2	<5	<10	<25	>25
Χλωροφύλλη-α (μέγιστη τιμή)	(μg/l)	<5	<10	<20	<50	>50
Διαφάνεια (μέσος όρος)	(m)	>5	2-5	1,5-2	1-1,5	<1
Διαφάνεια (μέγιστη τιμή)	(m)	>3	1-3	0,7-1	<0,7	<0,7

Πίνακας 5: Πίνακας ταξινόμησης βάσει των ορίων της κατάστασης
ευτροφισμού σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες.

Παράμετρος	Μονάδες	Αγγλία	Ιρλανδία	Γαλλία	Ισπανία	Ιταλία
TP	(μg/l)	>50	>25	-	>30	Συνθήκες Αναφοράς
Χλωροφύλλη-α (μέσος όρος)	(μg/l)	-	-	>60	>8	>10
Χλωροφύλλη-α (μέγιστη τιμή)	(μg/l)	>30	>35	-	>25	>20
Διαφάνεια	(m)	<3	-	-	<3	<3

Πίνακας 6 Σύστημα ταξινόμησης λιμνών της Ελλάδας

Φυσικοχημικοί παράμετροι	Ευτροφισμός	Μεσοτροφικές συνθήκες	Ολιγοτροφικές συνθήκες
	Συχνότητα παραμετρικών τιμών		
	Συχνά	Συνήθως	Σπάνια
Κοντά στην επιφάνεια (επιλίμνιο)			
Χλωροφύλλη (μg/l)	>10	2 έως 10	<2
Νιτρικά ιόντα	>0,05	0,01 -0,05	<0,01
Φωσφορικά ιόντα	>0,05	0,01 -0,05	<0,01
Κοντά στον πυθμένα υπολίμνιο			
Οξυγόνο κορεσμού (%)	~ 0 (ανοξικές συνθήκες την καλοκαιρινή περίοδο)	0-100	0-100
Συγκέντρωση οξυγόνου (mg/l)	<4	4-7	>7
Υδάτινη στήλη			
Διαφάνεια δίσκος του Secchi	<2	2-5	>5

Σημείωση Συχνά: 8 με 9 δείγματα, Συνήθως 5 με 6, Σπάνια 1 με 2 δείγματα

2.1.8 Νομοθεσία για την ποιότητα των επιφανειακών υδάτων

Κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών '80 και '90 τόσο η οικονομική ανάπτυξη όσο και η εθνική νομοθεσία έχει επηρεαστεί από τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στην συνέχεια παραθέτονται στο πίνακα 7 η ισχύουσα ελληνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και την διασφάλιση της ποιότητας και ποσότητας των εσωτερικών υδάτων.

Πίνακας 7 Ισχύουσα Ελληνική Νομοθεσία και οι αντίστοιχες Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προστασία του περιβάλλοντος και την διασφάλιση Ποιότητας των εσωτερικών νερών.

Νόμος	Σκοπός	Περιγραφή
Νόμος 1650/86 για την προστασία του περιβάλλοντος	Προστασία επιφανειακού και υπόγειου νερού. Προσδιορισμός της επιθυμητής και επιτρεπόμενης ποιότητας των φυσικών υδάτινων σωμάτων	Απαιτεί παρακολούθηση σε εθνικό επίπεδο
Νόμος 1739/87 για την διαχείριση των υδάτινων πόρων	Διατύπωση της πολιτικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων.	Δημιουργεί ένα δίκτυο οργάνωσης και σωστής διαχείρισης των υδάτινων πόρων χωρίζοντας την χώρα σε 14 υδάτινες περιφέρειες. Ιδρύει ελέγχους παρακολούθησης και μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος
Οδηγία 75/440/ΕΟΚ Σχετικά για την ποιότητα του νερού που προορίζεται για πόσιμο	Μείωση της ρύπανσης των υδάτινων σωμάτων και την προστασία της ανθρώπινης υγείας καθορίζοντας τα όρια τιμών του νερού που προορίζεται για πόσιμο.	Το επιφανειακό νερό χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες (Α1, Α2 και Α3), κάθε μια σχετίζεται με κατάλληλες μεθόδους διαχείρισης. Τα επιθυμητά όρια για το πόσιμο νερό προσδιορίζουν την υλοποίηση των αντίστοιχων μεθόδων.
Οδηγία 76/564/ΕΟΚ Σχετικά με τα όρια των ρυπογόνων ουσιών	Μείωση των ρυπογόνων ουσιών και κυρίως των τοξικών.	Δημιουργεί μια λίστα τοξικών ουσιών με τα επιτρεπτά όρια.
Οδηγία 91/271/ΕΟΚ Σχετικά με την διαχείριση των αστικών λυμάτων	Προστασία του υδατικού περιβάλλοντος, ιδιαίτερα των ευαίσθητων περιοχών, απο την εναπόθεση αστικών λυμάτων τα οποία δεν έχουν επεξεργαστεί ικανοποιητικά.	Καθορίζει κατευθυντήριες γραμμές και χρονικά όρια, για την κατασκευή των σωλήνων αποχέτευσης και του ποσοστού διαχείρισης των αστικών αποβλήτων σύμφωνα με τον πληθυσμό, την ευαισθησία της περιοχής και την επαναχρησιμοποίηση της

		λάσπη. Επίσης δίδονται οδηγίες για την διαχείριση βιομηχανικών αποβλήτων. Απαιτεί παρακολούθηση της ποιότητας του νερού που αφήνεται στον τελικό υδάτινο αποδέκτη αλλά και της παραγόμενης υδάτινης λάσπης.
Οδηγία 91/676/ΕΟΚ Σχετική με την προστασία των υδάτινων σωμάτων από την ρύπανση που προέρχεται αγροτικές εκμεταλλεύσεις	Μείωση της υφιστάμενης ρύπανσης και την παρεμπόδιση μελλοντικής ρύπανσης του εδάφους και των επιφανειακών νερών από τα νιτρικά, τα οποία προέρχονται από τις αγροτικές δραστηριότητες	Απαιτεί πρόγραμμα παρακολούθησης των νιτρικών και νιτρώδων ιόντων τόσο στα επιφανειακά νερά όσο και στα υπόγεια νερά.
Οδηγία 2000/60/ΕΟΚ Καθορίζει ένα δίκτυο υδάτινης πολιτικής για τα κράτη μέλη	Καθορισμός ενός δικτύου υδάτινης πολιτικής για την προστασία των επιφανειακών, παράκτιων και υπόγειων υδάτων.	Καθορίζει το δίκτυο της διαχείρισης των υδάτινων σωμάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Προτείνει προγράμματα παρακολούθησης. Ορίζει στρατηγικές ενάντια στην ρύπανση με γνώμονα την αειφορική διαχείριση τους.
Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001-ΦΕΚ 892/11-7-2001	Καθορισμός ποιότητας πόσιμου νερού	Απαιτεί πρόγραμμα παρακολούθησης συγκεκριμένων παραμέτρων.
Υπουργική Απόφαση 15782/1849-ΦΕΚ 797 25 Ιουνίου 2001	Καθορισμός των κατευθυντήριων και οριακών τιμών ποιότητας των νερών των Λιμνών Βεγορίτιδος και Πετρών και του ποταμού Σουλού.	Απαιτεί Ειδικό Πρόγραμμα μείωσης της ρύπανσης με καθορισμό των κατευθυντήριων και οριακών τιμών ποιότητας των νερών από απόρριψης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών.
Διυπουργική Απόφαση ΦΕΚ 438Β,3-7-86	Καθορισμός προτύπων διαβίωσης ψαριών των γλυκών υδάτων	Απαιτεί πρόγραμμα παρακολούθησης συγκεκριμένων παραμέτρων.

Το **ΥΠΕΧΩΔΕ** (Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων) στα πλαίσια της οδηγίας 76/564 /ΕΟΚ δημιούργησε ένα δίκτυο παρακολούθησης το οποίο περιλαμβάνει 53 σταθμούς δειγματοληψίας σε 11 ποταμούς και 7 λίμνες και σε 4 θαλάσσιες περιοχές. Δυο σταθμοί δειγματοληψίας καθορίστηκαν για κάθε λίμνη εκτός από την λίμνη Δοϊράνη στην οποία καθορίστηκε ένας σταθμός δειγματοληψίας ενώ στην λίμνη Μεγάλη Πρέσπα καθορίστηκαν 4

σταθμοί δειγματοληψίας, οι δυο στο ένα μέτρο κάτω από την επιφάνεια και οι άλλοι δυο κάτω από την στρωματοποιημένη ζώνη.

Η λίμνη Ιωαννίνων συγκαταλέγεται μεταξύ των έξι ελληνικών λιμνών που χαρακτηρίστηκαν ως ευτροφικές από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος το 1996. Για τα έτη 2002-2004, λαμβάνοντας υπόψη τις μέσες μηνιαίες τιμές ορισμένων παραμέτρων (pH, βαθμός κορεσμού σε διαλυμένο οξυγόνο και NO_3) διαπιστώθηκε ότι ο βαθμός κορεσμού σε διαλυμένο οξυγόνο είναι εξαιρετικά χαμηλός-μόλις 6% τον Ιανουάριο του 2002 γεγονός που μπορεί να προκαλέσει συνθήκες ανοξίας (διατάραξη της ισορροπίας των συνθηκών που καθορίζουν την ποιότητα των υδάτων σε ανεπιθύμητη διαταραχή). Οι εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών (NO_3), οι οποίες έφθασαν ακόμη και τα 47,4 και 37,7 mg/l το Μάρτιο του 2003 και το Δεκέμβριο του 2002, αντιστοίχως και τα 3,6 mg/l το Νοέμβριο του 2004, μαρτυρούν υψηλό βαθμό ρύπανσης, ανεπιθύμητες συνθήκες όσον αφορά τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου και περίσσεια αζωτούχων ενώσεων στα ύδατα της λίμνης.

Σχετικά με την λίμνη Βεγορίτιδα τα δεδομένα παρακολούθησης είναι ελλιπέστατα. Για τα έτη 2002-2004, λαμβάνοντας υπόψη τις μέσες μηνιαίες τιμές ορισμένων ορισμένων παραμέτρων (pH, βαθμός κορεσμού σε διαλυμένο οξυγόνο και NO_3) που μετρήθηκαν σε τρεις θέσεις της λίμνης, διαπιστώθηκε ότι οι σχετικές με την ποιότητα των υδάτων παράμετροι είναι ικανοποιητικές. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών (9,3 και 25,7mg/l τον Ιούνιο και τον Οκτώβριο του 2002, αντιστοίχως. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών μαρτυρούν περίσσεια του εν λόγω ρύπου με πιθανή συνέπεια την διατάραξη της ισορροπίας στην ποιότητα των νερών της λίμνης. Η λίμνη Βεγορίτιδα ταξινομήθηκε ως μεσότροφη.

Η λίμνη της Καστοριάς δεν συμπεριλήφθηκε στην παραπάνω μελέτη. Όμως η λίμνη της Καστοριάς συγκαταλέγεται μεταξύ των έξι ελληνικών λιμνών που

χαρακτηρίστηκαν ως ευτροφικές από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος το 1996. Από το 1992 έως το 1996, οι μέσες συγκεντρώσεις αμμωνίας και φωσφόρου ανήλθαν σε περίπου $0,1 \text{ mg/l } \text{NH}_4 - \text{N}$ και $0,09 \text{ mg/l P}$, αντιστοίχως. Η συγκέντρωση αυτή φωσφόρου είναι υψηλότερη εκείνης που ορίζεται στα ελληνικά κριτήρια για τον ευτροφισμό των λιμνών. Απο τα δεδομένα παρακολούθησης που διαβίβασαν οι ελληνικές αρχές προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Για τα έτη 2001-2002, λαμβάνοντας υπόψη τις μέσες τιμές ορισμένων παραμέτρων (BOD, διαλυμένο οξυγόνο, νιτρικά, αμμώνιο, ολικός φώσφορος που μετρήθηκαν στη μέση της λίμνης, η Λίμνη Καστοριάς θα έπρεπε να ταξινομηθεί ως ευτροφική. Αυτό απορρέει απο τα αυξημένα επίπεδα BOD_5 (μέσες τιμές μεταξύ $4,0$ και $6,33 \text{ mg/l}$, αμμωνιακών ιόντων ($0,15$ έως $0,17 \text{ mg/l}$) ολικού P ($0,05 \text{ mg/l}$ το 2001, τιμή που υποδηλώνει ευτροφική κατάσταση και $0,03 \text{ mg/l}$ το 2002, που υποδηλώνει μεσοτροφική κατάσταση, σύμφωνα με τα κριτήρια του ΟΟΣΑ για την τροφική ταξινόμηση των λιμνών) και νιτρικών ($0,42$ - $0,39 \text{ mg/l}$).
- Για τα έτη 2002-2004 λαμβάνοντας υπόψη τις μέσες μηνιαίες τιμές ορισμένων παραμέτρων (pH, βαθμός κορεσμού σε διαλυμένο οξυγόνο και NO_3 μετρήθηκαν στη μέση της λίμνης διαπιστώνονται υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών, οι οποίες μαρτυρούν αυξημένη ρύπανση των υδάτων της λίμνης και περίσσεια αζωτούχων ενώσεων στα ύδατα αυτά. Τα δεδομένα παρακολούθησης των εν λόγω παραμέτρων για το 2004 κατέδειξαν ελαφρά μείωση της ρύπανσης.

Αξίζει να αναφερθεί ότι δεν διαβιβάστηκαν οι τιμές των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται κατά κανόνα για την εκτίμηση της τροφικής κατάστασης των

λιμνών, όπως βάθος κατά Secchi, ολικός φώσφορος, ολικό άζωτο , αναλογία N:P, καθώς και άλλων στοιχείων της βιολογικής ποιότητας (υπερισχύοντες τύποι φυκών)

Σε σχετικό άρθρο των Tsounis, Zervou, Hatzibiros & Andreadakis, 2002, το οποίο αναφέρεται στην κατάσταση των ελληνικών λιμνών, υπογραμμίζεται η γενική τάση υποβάθμισης τους.

2.2 Προσομοίωση λιμνών.

2.2.1 Εισαγωγή

Η λέξη μοντέλο(model) προέρχεται από το λατινικό modus που σημαίνει τρόπος, μέτρο. Το μοντέλο είναι δηλαδή κάτι που αντιπροσωπεύει κάτι άλλο (=πρότυπο), δίνοντας έμφαση σε ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του. Π.χ Μοντέλο μπορεί να είναι ένας χάρτης, τα σχέδια ή η μακέτα ενός κτιρίου.

Μαθηματικό μοντέλο είναι το μαθηματικό σύστημα που αντιπροσωπεύει μια πραγματική οντότητα ή κατάσταση. Παραδείγματα: Ευκλείδειος χώρος, μαθηματικό σύνολο, σύνολο εξισώσεων.

Προσομοίωση (simulation) είναι η τεχνική μίμησης ενός πραγματικού συστήματος, όπως αυτό εξελίσσεται στο χρόνο.

Μοντέλο προσομοίωσης (simulation model) είναι το σύνολο υποθέσεων για την λειτουργία του συστήματος, εκφρασμένων υπό μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων μεταξύ των αντικειμένων του συστήματος (και συνήθως κωδικοποιημένων σε πρόγραμμα υπολογιστή).

Έχοντας ένα μαθηματικό μοντέλο που πρέπει να μελετήσουμε με προσομοίωση (δηλαδή ένα Μοντέλο Προσομοίωσης), θα πρέπει να αναζητήσουμε κατάλληλα εργαλεία για το σκοπό αυτό. Στην προσπάθεια αυτή, είναι χρήσιμο να ταξινομήσουμε τα Μοντέλα Προσομοίωσης σε τέσσερις διαφορετικές έννοιες (Schnoor, 2003):

Στατικά και Δυναμικά Μοντέλα Προσομοίωσης. Ένα στατικό μοντέλο προσομοίωσης, αναπαριστά ένα σύστημα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ή αναπαριστά ένα σύστημα στο οποίο ο χρόνος δεν έχει σημασία. Αντίθετα, ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά ένα σύστημα, όπως αυτό εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου.

Αιτιοκρατικά και Στοχαστικά Μοντέλα Προσομοίωσης. Αν ένα μοντέλο προσομοίωσης δεν περιλαμβάνει πιθανοτικά (δηλαδή "τυχαία") τμήματα, ονομάζεται ντετερμινιστικό. Για παράδειγμα, ένα πολύπλοκο σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει μία χημική αντίδραση, μπορεί να είναι ένα τέτοιο μοντέλο. Στα ντετερμινιστικά μοντέλα, η έξοδος είναι καθορισμένη, με δεδομένο το σύνολο των ποσοτήτων και σχέσεων εισόδου του μοντέλου. Όμως, πολλά συστήματα πρέπει να χρησιμοποιήσουν στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης, δηλαδή μοντέλα που θα έχουν τουλάχιστον ορισμένα τμήματα με "τυχαία" είσοδο. Τα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα, που βασίζονται στα συστήματα αναμονής (queueing systems), χρησιμοποιούν στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης.

Αυτο-οδηγούμενα και Ιχνο-οδηγούμενα Μοντέλα Προσομοίωσης. Σε ένα αυτο-οδηγούμενο (self-driven) μοντέλο, υπάρχει μία εσωτερική πηγή τυχαίων αριθμών. Οι τυχαίοι αριθμοί οδηγούν τα τμήματα του μοντέλου, δηλαδή χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των στιγμών εμφανίσεων των γεγονότων του συστήματος. Το βασικό χαρακτηριστικό του αυτο-οδηγούμενου μοντέλου είναι ότι αποτελεί ένα αυτόνομο μοντέλο το οποίο δεν χρειάζεται εξωτερικές εισόδους (inputs) για να λειτουργήσει. Αντίθετα, ένα ιχνο-οδηγούμενο (trace-driven) μοντέλο καθοδηγείται από ακολουθίες εισόδου που προέρχονται από δεδομένα (trace data) που έχουν δημιουργηθεί από τη λειτουργία ενός πραγματικού συστήματος. Τέτοια δεδομένα μπορούν να παραχθούν στα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα που

διαθέτουν ενσωματωμένα προγράμματα ιχνηλάτησης (tracing programs) που παρακολουθούν και καταγράφουν τις δραστηριότητες του συστήματος. Τα ιχνο-οδηγούμενα μοντέλα έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι αποφεύγονται οι δυσκολίες της πιθανοτικής ανάλυσης που χρειάζεται για τη χρήση κατανομών στην περιγραφή των εισόδων του μοντέλου και επίσης το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά είναι εύκολο να επιβεβαιωθούν. Το πρόβλημα με τα ιχνο-οδηγούμενα μοντέλα είναι το μικρό εύρος εφαρμογών που μπορούν να αντιμετωπίσουν. Οι εφαρμογές αυτές πρακτικά περιορίζονται σε υπολογιστικά συστήματα και μάλιστα μόνο για τη μελέτη μετατροπών σε ένα σύστημα που ήδη λειτουργεί.

Συνεχή (Continuous) και Διακριτά (Discrete) Μοντέλα Προσομοίωσης.

Τα συνεχή μοντέλα στηρίζονται σε συνεχείς διαφορικές εξισώσεις με αναλυτικές λύσεις . Σήμερα υπάρχει μια γενική στροφή από τις συνεχείς διαφορικές εξισώσεις (continuous differential equations) προς στις εξισώσεις διαφορών (difference equations), όπου μοντελοποιούνται οι μεταβολές ενός συστήματος σε διακριτά χρονικά διαστήματα από πολύ μικρά έως ετήσια .

Πάντως, πρέπει να σημειωθεί ότι ένα διακριτό μοντέλο δεν χρησιμοποιείται μόνο για την αναπαράσταση ενός διακριτού συστήματος και ένα διακριτό σύστημα δεν αναπαριστάται μόνο από ένα διακριτό μοντέλο προσομοίωσης. Η απόφαση για τη χρήση ενός διακριτού ή ενός συνεχούς μοντέλου για ένα συγκεκριμένο σύστημα, εξαρτάται από τους ιδιαίτερους στόχους της μελέτης. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο της ροής πακέτων δεδομένων σε ένα WAN, θα είναι διακριτό εάν μας ενδιαφέρουν τα χαρακτηριστικά και η κίνηση των επιμέρους πακέτων και κατά συνέπεια των επιμέρους χρηστών. Αντίθετα, αν μας ενδιαφέρει μόνο η συνολική κίνηση, η ροή των πακέτων θα μπορούσε ίσως να περιγραφεί με διαφορικές εξισώσεις σε ένα συνεχές μοντέλο (Ripley,1987).

Τα μοντέλα προσομοίωσης που θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια, θα είναι διακριτά, δυναμικά, στοχαστικά και αυτο-οδηγούμενα και θα ονομάζονται Μοντέλα Προσομοίωσης Διακριτών Γεγονότων (discrete event simulation models). Μάλιστα, αφού τα ντετερμινιστικά μοντέλα μπορούν να θεωρηθούν ειδικές περιπτώσεις των στοχαστικών μοντέλων, δεν θα έχουμε απώλεια της γενικότητας στη μελέτη των μοντέλων προσομοίωσης.

2.2.2 Ο Μηχανισμός Εξέλιξης του Χρόνου.

Λόγω του δυναμικού χαρακτήρα των μοντέλων προσομοίωσης διακριτών γεγονότων, πρέπει να έχουμε τη δυνατότητα αποθήκευσης της τρέχουσας τιμής του προσομοιωμένου χρόνου, ενώ χρειαζόμαστε και ένα μηχανισμό αύξησής του από μία τιμή σε μία άλλη. Η μεταβλητή του μοντέλου προσομοίωσης που μας δίνει την τρέχουσα τιμή του χρόνου, ονομάζεται ρολόι προσομοίωσης (simulation clock). Η μονάδα χρόνου που χρησιμοποιεί το ρολόι είναι συνήθως η ίδια με αυτή που χρησιμοποιούν οι παράμετροι εισόδου, ενώ γενικά δεν υπάρχει σχέση του χρόνου που καταγράφει το ρολόι, με το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση του προσομοιωτή στον υπολογιστή.

Ιστορικά έχουν επικρατήσει δύο βασικές μέθοδοι για την εξέλιξη του ρολογιού προσομοίωσης: Η Εξέλιξη με βάση το Χρόνο του Επομένου Γεγονότος (next-event time advance) και η Εξέλιξη Σταθερής Αύξησης του Χρόνου (fixed-increment time advance). Θα χρησιμοποιήσουμε την πρώτη μέθοδο διότι είναι πιο διαδεδομένη και διότι η δεύτερη μπορεί να θεωρηθεί ειδική περίπτωση της πρώτης.

Στη μέθοδο εξέλιξης με βάση το χρόνο του επομένου γεγονότος, το ρολόι προσομοίωσης αρχικοποιείται στο μηδέν και καθορίζονται οι στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων. Το ρολόι τότε αυξάνει στο χρόνο εμφάνισης του πιο κοντινού στο μέλλον, από τα γεγονότα αυτά. Τη στιγμή αυτή η κατάσταση του

συστήματος ενημερώνεται ώστε να πάρει υπ' όψη της το γεγονός που εμφανίστηκε, ενώ ενημερώνεται επίσης η γνώση μας για τις χρονικές στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων. Στη συνέχεια, το ρολόι αυξάνει ώστε να δείχνει τη στιγμή εμφάνισης του νέου πιο κοντινού στο μέλλον γεγονότος, η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται, καθορίζονται οι χρονικές στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων κ.ο.κ.

Η διαδικασία αυτή εξέλιξης του ρολογιού προσομοίωσης από το ένα γεγονός στο άλλο, συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποια προκαθορισμένη συνθήκη τερματισμού της προσομοίωσης. Αφού όλες οι αλλαγές κατάστασης γίνονται μόνο στις χρονικές στιγμές εμφάνισης των γεγονότων, οι ενδιάμεσες ανενεργοί περίοδοι δεν λαμβάνονται υπ' όψη και το ρολόι μετακινείται αυτόματα στη στιγμή εμφάνισης του επομένου γεγονότος.

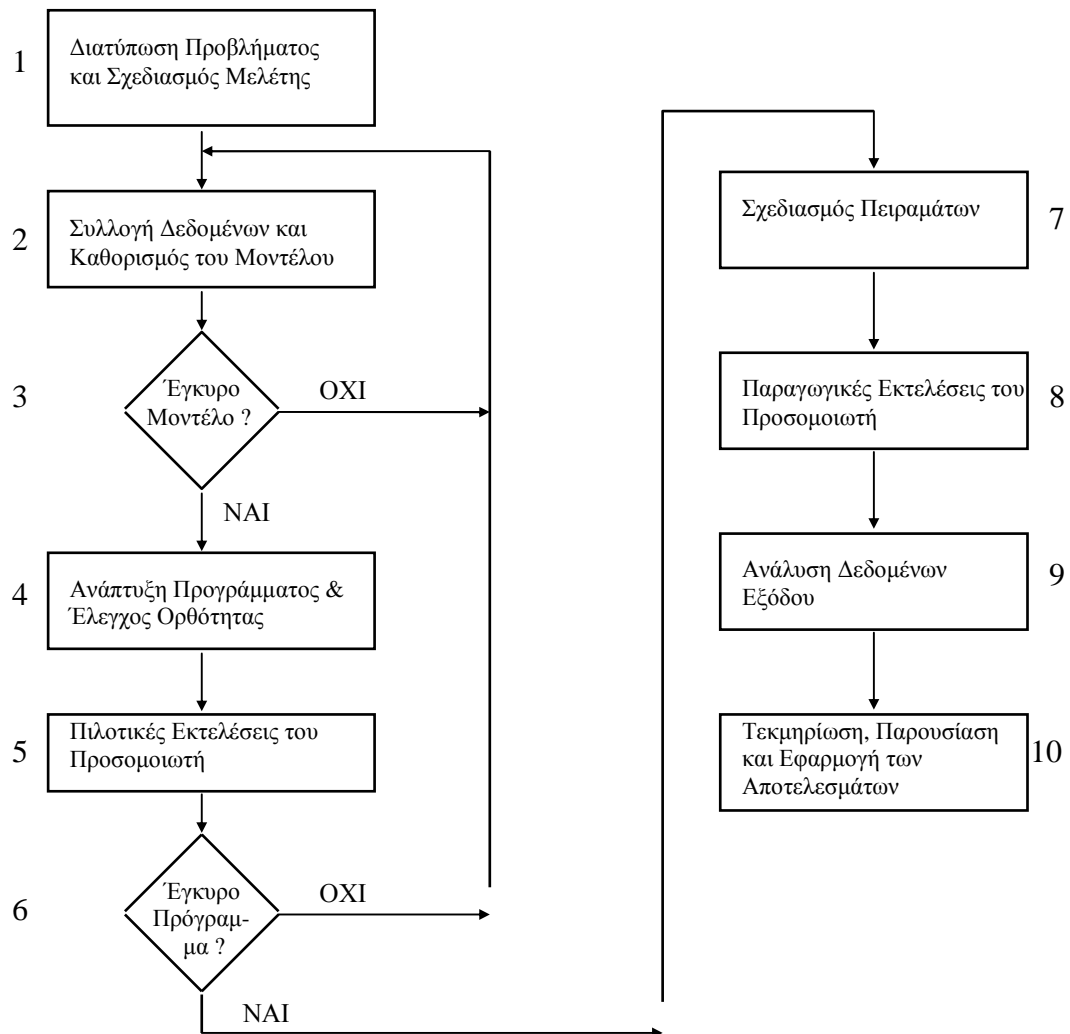
Όσον δε αφορά τη μέθοδο εξέλιξης σταθερής αύξησης του χρόνου, το ρολόι προσομοίωσης εξελίσσεται με σταθερές αυξήσεις ακριβώς Δt μονάδων χρόνου κάθε φορά. Μετά από κάθε ενημέρωση του ρολογιού, γίνεται ένας έλεγχος για να εξακριβωθεί εάν θα έπρεπε να έχουν εμφανισθεί κάποια γεγονότα κατά το προηγούμενο χρονικό διάστημα Δt . Αν εμφανίσθηκαν γεγονότα στο διάστημα αυτό, θεωρούμε ότι αυτά εμφανίζονται στο τέλος του χρονικού διαστήματος και η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται κατάλληλα.

Η οργάνωση και η λειτουργία ενός προγράμματος προσομοίωσης διακριτών γεγονότων που χρησιμοποιεί το μηχανισμό εξέλιξης με βάση το χρόνο του επομένου γεγονότος, όπως περιγράφηκε παραπάνω, είναι τυπική για την ανάπτυξη προσομοιωτών με γλώσσες προγραμματισμού γενικού σκοπού όπως η C, η Pascal και η FORTRAN. Ονομάζεται Προσέγγιση Χρονοδρομολόγησης Γεγονότων (event-scheduling approach) στη μοντελοποίηση της προσομοίωσης, διότι οι χρονικές

στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων κωδικοποιούνται στο μοντέλο και προγραμματίζονται να εμφανισθούν στο προσομοιωμένο μέλλον (Ripley, 1987).

1.3.4 Τα Βήματα μιας Μελέτης με Προσομοίωση.

Στην Εικόνα 14 φαίνονται τα βήματα που ακολουθεί μία τυπική μελέτη ενός συστήματος με χρήση προσομοίωσης.



Εικόνα 14 Τα βήματα μιας μελέτης Προσομοίωσης

Η προσομοίωση είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και συνεχώς πιο δημοφιλής μέθοδος για τη μελέτη πολύπλοκων συστημάτων. Έχει φυσικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, αλλά και υπάρχουν πολλοί λόγοι εξ αιτίας των οποίων ορισμένες προσομοιώσεις δεν καταλήγουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Ορισμένα πιθανά πλεονεκτήματα της χρήσης της προσομοίωσης είναι τα παρακάτω:

- Τα περισσότερα σύνθετα συστήματα του πραγματικού κόσμου με "τυχαίες" παραμέτρους, δεν μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά με κάποιο μαθηματικό μοντέλο που μπορεί να λυθεί αναλυτικά. Έτσι, η προσομοίωση είναι συχνά η μόνη διαθέσιμη μέθοδος μελέτης.
- Η προσομοίωση επιτρέπει την εκτίμηση της απόδοσης ενός υπάρχοντος συστήματος, κάτω από κάποιο προβλεπόμενο σύνολο λειτουργικών συνθηκών.
- Μπορούν να συγκριθούν μέσω της προσομοίωσης, εναλλακτικές προτεινόμενες σχεδιάσεις ή εναλλακτικές πολιτικές λειτουργίας του συστήματος, ώστε να προσδιορισθεί η βέλτιστη λύση που ικανοποιεί τις προδιαγραφές που έχουν ορισθεί.
- Σε ένα μοντέλο προσομοίωσης μπορούμε να έχουμε καλύτερο έλεγχο στις συνθήκες των πειραμάτων, σε σχέση με πιθανό πειραματισμό με το πραγματικό σύστημα.
- Η προσομοίωση επιτρέπει τη μελέτη ενός συστήματος που έχει μακρόχρονη εξέλιξη (π.χ. ένα οικονομικό σύστημα), σε πολύ μικρότερο χρόνο, ή τη μελέτη της λεπτομέρειάς του σε περισσότερο χρόνο.
- Είναι μια μέθοδος οικονομική, αφού είναι δυνατό να υλοποιηθεί πλέον σε μικρούς υπολογιστές με τη χρήση γλωσσών προγραμματισμού γενικού σκοπού όπως η C, η Pascal και η BASIC.
- Η προσομοίωση μπορεί να υλοποιηθεί από επιστήμονες που δεν είναι απαραίτητο να έχουν εκτεταμένες μαθηματικές γνώσεις, παρά μόνο τη δυνατότητα να κατανοούν βασικές έννοιες στατιστικής και να μπορούν να εφαρμόζουν ήδη έτοιμα μαθηματικά εργαλεία.

Ορισμένα μειονεκτήματα της προσομοίωσης είναι τα παρακάτω:

- Κάθε εκτέλεση ενός μοντέλου προσομοίωσης διακριτών γεγονότων παράγει μόνο εκτιμήσεις των πραγματικών χαρακτηριστικών του μοντέλου, για ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων εισόδου. Έτσι, είναι πιθανό να χρειασθούν πολλές διαφορετικές ανεξάρτητες εκτελέσεις του μοντέλου για κάθε σύνολο παραμέτρων εισόδου που θα μελετηθεί. Για το λόγο αυτό, η προσομοίωση δεν είναι γενικά τόσο καλή μέθοδος για βελτιστοποίηση, όσο είναι για τη σύγκριση εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων του συστήματος (Ripley, 1987).
- Τα μοντέλα προσομοίωσης συχνά απαιτούν πολύ χρόνο και πόρους για να αναπτυχθούν.
- Ο μεγάλος όγκος αριθμών που παράγονται από μία μελέτη προσομοίωσης ή η εντύπωση που δημιουργούν οι τυχόν γραφικές αναπαραστάσεις των αποτελεσμάτων της, συχνά ενισχύουν μία τάση να δίνεται μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα αυτά από όσο πρέπει. Αν το μοντέλο δεν είναι μία αρκετά έγκυρη αναπαράσταση του συστήματος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ανεξάρτητα του πόσο εντυπωσιακά είναι, θα προσθέσουν λίγη χρήσιμη πληροφορία για το πραγματικό σύστημα.
- Από τη στιγμή που έχει ληφθεί η απόφαση να χρησιμοποιηθεί προσομοίωση για τη μελέτη ενός συστήματος, έχει παρατηρηθεί ότι μπορούν να εμφανισθούν αρκετά προβλήματα στην πορεία υλοποίησης ενός επιτυχημένου προσομοιωτή:
 - Οι στόχοι δεν ορίζονται επιτυχώς κατά την έναρξη της μελέτης.
 - Το επίπεδο λεπτομέρειας του μοντέλου είναι μερικές φορές ακατάλληλο.
 - Ο Χειρισμός της μελέτης με προσομοίωση, σαν να ήταν βασικά μία δύσκολη άσκηση προγραμματισμού.

- Η έλλειψη στοιχειωδών γνώσεων Επιχειρησιακής Έρευνας και Στατιστικής.
- Η χρήση εμπορικών πακέτων προσομοίωσης μπορεί να περιέχουν λάθη ή να μην υλοποιούν τη λογική του συστήματος.
- Η αποτυχία στη σωστή καταγραφή των πηγών τυχαιότητας του συστήματος.
- Η χρήση αυθαίρετων κατανομών (π.χ. κανονική ή ομοιόμορφη) για την περιγραφή των εισόδων του προσομοιωτή.
- Η ανάλυση των δεδομένων εξόδου από μία εκτέλεση του προσομοιωτή, με τη χρήση στατιστικών τύπων που προϋποθέτουν ανεξαρτησία.
- Η χρήση λανθασμένων μέτρων απόδοσης.

2.2.4 Η δομή των μοντέλων ποιότητας νερού

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι μοντέλων ποιότητας και επομένως είναι απαραίτητη μια ταξινόμησή τους. Τα μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με μια σειρά από κριτήρια. Για παράδειγμα μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον χρόνο έτσι μιλάμε για σταθερά μοντέλα, μεταβατικά και δυναμικά μοντέλα.

Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης των μοντέλων είναι βάση της μαθηματικής τους δομής έτσι διακρίνουμε τα εμπειρικά και τα μηχανιστικά. Τα εμπειρικά βασίζονται σε τύπους που έχουν προκύψει με βάση μακροχρόνιες παρατηρήσεις και συσχετίζουν παραμέτρους μεταξύ τους. Τα μοντέλα μπορούν επίσης να διαιρεθούν σε ντετερμινιστικά και πιθανολογικά-στοχαστικά μοντέλα. Στα ντετερμινιστικά παράγεται μόνο μια λύση σαν αποτέλεσμα, ενώ στα στοχαστικά και στα πιθανολογικά παράγονται διάφορα αποτελέσματα σύμφωνα με το εκάστοτε σενάριο.

Επίσης τα μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό τους σε μοντέλα μεταφοράς και σε οικολογικά μοντέλα (Schnoor,2003). Εάν η χωρική κατανομή διάφορων συστατικών θεωρείται σημαντική τότε ένα μοντέλο

μεταφοράς είναι το καταλληλότερο. Εάν η οικολογική δομή μιας λίμνης είναι το αντικείμενο μελέτης το οικολογικό μοντέλο είναι αυτό που εφαρμόζεται.

Τα μοντέλα ταξινομούνται και σύμφωνα με την διάστασή τους . Υπάρχουν τρισδιάστατα μοντέλα, δισδιάστατα, μονοδιάστατα και μηδενικής διάστασης μοντέλα. Τα μοντέλα μεταφοράς είναι συνήθως τρισδιάστατα και δισδιάστατα. Ενώ τα μονοδιάστατα και τα μηδενικής διάστασης περιγράφουν το λιμναίο οικοσύστημα για παράδειγμα τα μηδενικής διάστασης μοντέλα θεωρούν την λίμνη ως πλήρως ομογενοποιημένη χωρίς χωρική μεταβλητότητα (Heinonen, Ziglio & Van der Beken, 2000).

Τα μηχανιστικά μοντέλα ποιότητας νερού βασίζονται στις συγκεντρώσεις ισορροπίας στην κινητική αρχή και στην αρχή της στοιχειομετρίας. Υπάρχουν τρεις αρχές ισορροπίας:

- Αρχή διατήρησης της μάζας
- Αρχή διατήρησης της ποσότητας κίνησης
- Αρχή διατήρησης της ενέργειας.

Η αρχή διατήρησης της μάζας θα πρέπει να συνυπολογίζεται σε όλα τα μοντέλα ποιότητας, ενώ η αρχή διατήρησης της ενέργειας απαιτείται σε μοντέλα όπου η θερμοκρασία προσομοιώνεται ως σταθερή μεταβλητή.

Στα μοντέλα ποιότητας το λιμναίο σύστημα χαρακτηρίζεται με σταθερές μεταβλητές, π.χ θερμοκρασία, διαφορετικές συγκεντρώσεις και διαφορετική βιομάζα. Το σύστημα επηρεάζεται από δυναμικές συναρτήσεις όπως για παράδειγμα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και των εισερχόμενων ρυπογόνων συγκεντρώσεων διάφορων συστατικών.

Οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις διάφορες σταθερές παραμέτρους και τις μεταβλητές και των παραγόντων που τις επηρεάζουν αποτελούν την εξέλιξη του

μοντέλου. Στις εξισώσεις που τις περιγράφουν υπάρχουν συντελεστές και σταθερές οι οποίοι ονομάζονται παράμετροι. Μια μεταβλητή είναι η ποσότητα που προσομοιώνεται στο μοντέλο ενώ η παράμετρος είναι μια σταθερά στην εξίσωση του μοντέλου.

2.2.5 Περιγραφή των εσωτερικών φυσικών χημικών και βιολογικών διεργασιών στα λιμναία οικοσυστήματα.

Οι μη υδραυλικές διεργασίες του λιμναίου οικοσυστήματος περιγράφονται ως εσωτερικές. Για τις λίμνες περιγράφονται ως εσωτερικές οι ακόλουθες διεργασίες:

- Η ιζηματοποίηση
- Ο επαναερισμός
- Η οξείδωση
- Η ανάπτυξη
- Η αποσύνθεση
- Η λήψη των διάφορων θρεπτικών
- Απελευθέρωση των θρεπτικών
- Η προσρόφηση
- Η εξάτμιση

Σύμφωνα με την κινητική αρχή, ο ρυθμός αλλαγής της συγκέντρωσης υπολογίζεται ως προϊόν ή ως συνάρτηση της συγκέντρωσης και ενός συντελεστή της συγκέντρωσης. Ο βαθμός της επίδρασης εξαρτάται από την δύναμη στην οποία η συγκέντρωση αυξάνει. Π.χ η πρώτου βαθμού αντίδραση, ή κινητική α τάξης μπορεί να περιγραφεί με την σχέση:

$$\frac{d_c}{d_t} = k_1 c$$

k_1 είναι συντελεστής και c η συγκέντρωση

Η παράγωγος στο αριστερό τμήμα της εξίσωσης παρουσιάζει τον ρυθμό μεταβολής της συγκέντρωσης. Η κατεύθυνση της αντίδρασης εξαρτάται από το k_1 το οποίο όταν είναι θετικό η συγκέντρωση αυξάνει ενώ όταν είναι αρνητικό η συγκέντρωση μειώνεται.

Η δευτέρου βαθμού κινητική εξίσωση περιγράφεται ως εξής:

$$\frac{d_c}{d_t} = k_2 c^2$$

όπου k_2 είναι ο συντελεστής της αντίδρασης.

Όμως υπάρχει η πιθανότητα που ο ρυθμός αντίδρασης να εξαρτάται από δυο διαφορετικές συγκεντρώσεις όπως περιγράφεται στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{d_c}{d_t} = k_2 c_1 c_2$$

Ο βαθμός της αντίδρασης μπορεί να είναι επίσης μηδενικός που σημαίνει ότι ο ρυθμός αντίδρασης είναι σταθερός:

$$\frac{d_c}{d_t} = k_0$$

όπου k_0 είναι ο συντελεστής της αντίδρασης

Επιπρόσθετα υπάρχουν και άλλοι τύποι κινητικών εξισώσεων. Ένας πολύ διαδεδομένος τύπος είναι αυτός του **Michaelis-Menten** :

$$\frac{d_c}{d_t} = k_m \frac{c}{K_c + c}$$

όπου k_m είναι η μέγιστη τιμή του ρυθμού αντίδρασης (αντιστοιχεί σε $c = \infty$) ($M L^{-3}$)

και K_c η σταθερά για συγκέντρωση στο μισό του κορεσμού για την συγκέντρωση c ($M L^{-3}$) .

Η άλλη κύρια αρχή των μηχανιστικών μοντέλων ποιότητας είναι η αρχή της στοιχειομετρίας η οποία διέπει ότι οι αντιδράσεις των διαφόρων συστατικών

πραγματοποιούνται με σταθερή αναλογία και περιγράφονται με στοιχειομετρικούς συντελεστές. Αυτό μπορεί να περιγραφεί σαν ένα παράδειγμα το οποίο περιγράφει τις διεργασίες οξείδωσης του αμμωνιακού αζώτου.

Στο πρώτο βήμα της νιτροποίησης η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρώδη , σύμφωνα με την παρακάτω:

$$\frac{dN_1}{d_t} = -\beta_1 N_1$$

όπου N_1 είναι η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου και β_1 ο συντελεστής νιτροποίησης (T^{-1})

Η νιτροποίηση καταναλώνει οξυγόνο και ο ρυθμός κατανάλωσης μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$\frac{dO_2}{d_t} = -a_1 \beta_1 N_1$$

όπου O_2 είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου και a_1 ο συντελεστής της στοιχειομετρικής κατανάλωσης οξυγόνου της νιτροποίησης ($\approx 3,4 mg l^{-1}$ διαλυμένου οξυγόνου για $1 mg l^{-1}$ αμμωνιακού αζώτου)

Η συγκέντρωση του νιτρώδους αζώτου εξαρτάται από την νιτροποίηση ενώ το δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης εξαρτάται από την οξείδωση των νιτρώδων σε νιτρικά όπως ακολούθως:

$$\frac{dN_2}{d_t} = \beta_1 N_1 = -\beta_2 N_2$$

όπου N_2 είναι η συγκέντρωση του νιτρώδους αζώτου και β_2 ο συντελεστής του νιτροποίησης (T^{-1}).

Η κατανάλωση οξυγόνου μπορεί να περιγραφεί :

$$\frac{dO_2}{d_t} = -a_2 \beta_2 N_2$$

όπου α_2 είναι ο στοιχειομετρικός συντελεστής της κατανάλωσης οξυγόνου στο δεύτερο στάδιο νιτροποίησης ($\approx 1.1 \text{ mg l}^{-1}$ διαλυμένου οξυγόνου για κάθε 1 mg l^{-1} αμμωνιακού αζώτου).

Τελικά ο ρυθμός μεταβολής του νιτρικού αζώτου περιγράφεται με την σχέση:

$$\frac{dN_3}{dt} = \beta_2 N_2$$

όπου N_3 είναι η συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι άλλες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια των σταδίων νιτροποίησης δεν ελήφθησαν υπόψη όπως η δέσμευση των μορφών αζώτου από τους οργανισμούς ή η απελευθέρωση τους από το ίζημα.

2.2.6 Εφαρμογή των μοντέλων ποιότητας νερού

Υπάρχουν διαφορετικοί σκοποί για τους οποίους τα μοντέλα εφαρμόζονται. Συχνά χρησιμοποιούνται για την εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης, όπου απαιτείται η ταυτοποίηση της υπάρχουσας οικολογικής κατάστασης του νερού. Τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να κάνουν προσεγγίσεις σχετικά με το πως μελλοντικά μια ανάπτυξη θα έχει επίδραση στους υδάτινους πόρους. Τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν την συνεισφορά διαφορετικών παραγόντων στην αλλαγή ποιότητας του νερού και φυσικά χρησιμοποιούνται στα πλαίσια επιστημονικών ερευνών όπου βοηθούν στην επεξήγηση πολλών φαινομένων.

Ένα κύριο φαινόμενο εξηγείται με την χρήση μοντέλων είναι αυτό του ευτροφισμού. Ο απλούστερος τρόπος είναι με τα σταθερά μοντέλα ισορροπίας του φωσφόρου (Vollenweider, 1968; Lappalainen, 1974; Dillon and Rigler, 1974; Frisk et al. 1981). Η μόνη σταθερή μεταβλητή είναι ο μέσος όρος της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου. Στα πιο προηγμένα μοντέλα ευτροφισμού προσομοιώνεται το

φυτοπλαγκτόν. Το φυτοπλαγκτόν προσομοιώνεται σαν μια κοινότητα ή μπορεί να χωριστεί σε διάφορες ομάδες.

Τα μοντέλα επίσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της οξύτητας των λιμνών, των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, των συγκεντρώσεων ρυπογόνων ουσιών, των τοξικών ρύπων, των κλιματολογικών συνθηκών και του υδατικού ισοζυγίου.

Η επιλογή των σταθερών μεταβλητών εξαρτάται από το πρόβλημα που καλούμαστε να επιλύσουμε μέσα από κάποιο μοντέλο. Επίσης εξαρτάται από τα διαθέσιμα δεδομένα και την πιθανότητα να γίνουν ολοκληρωμένες μετρήσεις. Στην επιλογή είναι αναγκαία η γνώση των συμπεριφορών των διάφορων συστατικών στο λιμναίο περιβάλλον.

Τα μέσα που απαιτούνται για την επιτυχία ενός μοντέλου είναι η ύπαρξη δεδομένων, η δυνατότητα συλλογής νέων στοιχείων, ο χρόνος, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και τέλος πολυεπιστημονική ομάδα εμπειρογνομόνων η οποία θα αποφανθεί για τα αποτελέσματα του μοντέλου. Τα μοντέλα δεν είναι παγκόσμιας εφαρμογής και το καθένα απαιτεί βαθμονόμηση πριν εφαρμοστεί σε μια λίμνη.

2.2.7 Βαθμονόμηση και Επαλήθευση του Μοντέλου

Για την μαθηματική μοντελοποίηση των υδατικών χημικών ουσιών είναι απαραίτητα τέσσερα στοιχεία: 1) Δεδομένα πεδίου για τις συγκεντρώσεις των χημικών ουσιών και τις εισροές μάζας, 2) Η διατύπωση του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου, 3) οι σταθερές ρυθμών και συντελεστές ισορροπίας για το μαθηματικό μοντέλο και τέλος 4) μερικά κριτήρια απόδοσης με τα οποία θα εκτιμηθεί το μοντέλο.

Χωρίς τα δεδομένα πεδίου, είναι αδύνατη η βαθμονόμηση και η επαλήθευση του μοντέλου. Ανάλογα με την χρήση του μοντέλου ποικίλει ο βαθμός αναγνώρισης

του πεδίου. Εάν το μοντέλο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την έκδοση κανονισμών, θα πρέπει να υπάρχουν πολλά δεδομένα πεδίου ώστε να είμαστε βέβαιοι για τα αποτελέσματα του μοντέλου. Συνήθως, αυτό απαιτεί δυο σύνολα μετρήσεων πεδίου: ένα για τη βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου και ένα για την επαλήθευση (valuation) σε ελαφρώς διαφορετικές συνθήκες (μετρήσεις από διαφορετική χρονιά ή σε άλλο μέρος).

Η βαθμονόμηση του μοντέλου περιλαμβάνει σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων πεδίου. Οι συντελεστές του μοντέλου και οι σταθερές ρυθμών θα πρέπει αρχικά να επιλεγθούν με βάση τη βιβλιογραφία ή από εργαστηριακές μελέτες. Για την λειτουργία του μοντέλου είναι επίσης απαραίτητοι οι ρυθμοί των εισροών. Αφού ολοκληρωθεί το «τρέξιμο» του μοντέλου, γίνεται μια στατιστική σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τις μεταβλητές κατάστασης (συγκεντρώσεις χημικών ουσιών) και των μετρήσεων πεδίου. Εάν τα σφάλματα δεν είναι αποδεκτά, τότε οι σταθερές ρυθμού και οι συντελεστές θα πρέπει να μεταβληθούν συστηματικά (ρύθμιση του μοντέλου) μέχρι να επιτευχθεί μια αποδεκτή προσομοίωση. Οι παράμετροι δε θα πρέπει να καθοριστούν έξω από τα όρια των πειραματικά προσδιορισμένων τιμών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Με τον τρόπο αυτό βαθμονομείται το μοντέλο.

Μπορεί να φανούν χρήσιμοι μερικοί ορισμοί που έχουν να κάνουν με την βαθμονόμηση και την επαλήθευση του μοντέλου:

- **Μαθηματικό μοντέλο:** μια ποσοτική διατύπωση χημικών, φυσικών και βιολογικών διαδικασιών που προσομοιώνει το σύστημα.
- **Μεταβλητή κατάσταση:** η εξαρτημένη μεταβλητή που μοντελοποιείται (με αυτή την έννοια είναι συνήθως η συγκέντρωση μιας χημικής ουσίας).

- **Παράμετροι μοντέλου:** συντελεστές του μοντέλου που χρησιμοποιούνται για τη διατύπωση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας (π.χ. σταθερές ρυθμών, σταθερές ισορροπίας, στοιχειομετρικές αναλογίες)
- **Είσοδοι του μοντέλου:** δρώσες συναρτήσεις ή σταθερές που απαιτούνται για τη λειτουργία του μοντέλου (π.χ. ροή, συγκεντρώσεις χημικών ουσιών στην είσοδο, θερμοκρασία, ηλιοφάνεια).
- **Βαθμονόμηση:** μια στατιστικά αποδεκτή σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου και των μετρήσεων πεδίου. Η ρύθμιση ή προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου επιτρέπεται μέσα στα όρια των πειραματικώς προσδιορισμένων τιμών που πάρθηκαν πειραματικά και στην βιβλιογραφία.
- **Επαλήθευση :** μια στατιστικά αποδεκτή σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και ενός δεύτερου (ανεξάρτητου) συνόλου δεδομένων πεδίου, τα οποία αναφέρονται σε άλλη χρονιά ή σε διαφορετική τοποθεσία. Μετά από το στάδιο της βαθμονόμησης σταθεροποιούνται οι παράμετροι του μοντέλου και δεν επιτρέπεται περαιτέρω ρύθμιση.
- **Προσομοίωση :** χρήση του μοντέλου με οποιαδήποτε σύνολο δεδομένων εισόδου (ακόμα και υποθετικής εισόδου) χωρίς απαίτηση για βαθμονόμηση ή επαλήθευση με δεδομένα πεδίου.
- **Έλεγχος αξιοπιστίας:** επιστημονική αποδοχή ότι 1) το μοντέλο περιλαμβάνει όλες τις βασικές και αξιοπρόσεκτες διαδικασίες, 2) οι διαδικασίες έχουν διατυπωθεί σωστά και 3) το μοντέλο περιγράφει με κατάλληλο τρόπο τα παρατηρούμενα φαινόμενα, σύμφωνα με τις ανάγκες χρήσης του.
- **Ευρωστία:** χρησιμότητα του μοντέλου που έχει εδραιωθεί έπειτα από επανειλημμένες εφαρμογές υπό διαφορετικές συνθήκες και σε διαφορετικές τοποθεσίες.

- **Λεπτομερής εξέταση:** περαιτέρω σύγκριση παλαιών προβλέψεων του μοντέλου με μετρήσεις πεδίου που γίνονται αυτή την χρονική στιγμή.
- **Ανάλυση ευαισθησίας:** προσδιορισμός της επίδρασης μιας μικρής μεταβολής των παραμέτρων του μοντέλου στα αποτελέσματα (μεταβλητή κατάστασης), είτε με αριθμητική προσομοίωση ή με μαθηματικές τεχνικές.
- **Ανάλυση αβεβαιότητας:** προσδιορισμός της αβεβαιότητας (τυπική απόκλιση) της προβλεπόμενης τιμής της μεταβλητής κατάστασης (μέση) λόγω αβεβαιότητας στις παραμέτρους του μοντέλου, στις εισόδους ή στην αρχική κατάσταση, με χρήση τεχνικών στοχαστικής μοντελοποίησης.

Τα στατιστικά κριτήρια για την αποδοχή της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης ενός μοντέλου θα πρέπει να ορίζονται εξ' αρχής, πριν ξεκινήσουν οι προσομοιώσεις. Το πόσο καλά είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου εξαρτάται από την επιθυμητή χρήση του μοντέλου ή των προβλέψεων. Ομοίως, τα κριτήρια για την αποδοχή κάποιας βαθμονόμησης ή επαλήθευσης εξαρτώνται από την επιθυμητή χρήση του μοντέλου ή των προβλέψεων. Ομοίως, τα κριτήρια για την αποδοχή κάποιας βαθμονόμησης ή επαλήθευσης εξαρτώνται από την επιθυμητή χρήση του μοντέλου. Για παράδειγμα, ένα κριτήριο για την αποδοχή μιας βαθμονόμησης μοντέλου για διαλυμένο οξυγόνο μπορεί να είναι το εξής: Η πρόβλεψη της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο ρέμα θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στα όρια του $\pm 0.5\text{mg/l}$, τουλάχιστον στο 90% των παρατηρήσεων. Υπάρχουν αρκετοί τύποι στατιστικών κριτηρίων που μπορούν να δημιουργούν.

- Στατιστικά κριτήρια “καταλληλότητας της προσαρμογής”, τα οποία χρησιμοποιούν την κατανομή χ^2 ή τα τεστ **Kolmogov-Smirnov** (τεστ της κατανομής δειγματοληψίας της διακύμανσης).

- Ταυτόχρονες δοκιμές t ανά ζεύγη των παρατηρήσεων του μοντέλου και των παρατηρήσεων από το πεδίο (δοκιμή του μέσου).
- Γραμμική παρεμβολή δεδομένων ανά ζεύγη για προβλέψεις του μοντέλου και παρατηρήσεις πεδίου ταυτόχρονα.
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις μετρήσεις πεδίου για κανονική τους απόκλιση (ή την γεωμετρική απόκλιση, εάν είναι η κατάλληλη).
- Τεχνικές εκτίμησης παραμέτρων, όπως οι μη γραμμικές παλινδρομήσεις για την προσέγγιση καμπύλης (σταθμισμένες ή μη) ή τα φίλτρα **Kalman**, για το βέλτιστο προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου (π.χ. ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του τετραγώνου των υπολειμμάτων).

Για τον έλεγχο αξιοπιστίας του μοντέλου είναι απαραίτητη μια στατιστική σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και ενός δεύτερου συνόλου δεδομένων πεδίου. Οι συντελεστές και οι σταθερές ρυθμού δεν επιτρέπεται να αλλάξουν από την στιγμή που γίνει η βαθμονόμηση. Η διαδικασία αυτή παρέχει μια βεβαιότητα ότι το μοντέλο αποδίδει σε αποδεκτά επίπεδα. Τα κριτήρια απόδοσης μπορεί να είναι πολύ ελαστικά, όπως ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου θα πρέπει να βρίσκονται μέσα σε μια τάξη μεγέθους των συγκεντρώσεων πεδίου σε κάθε χρονική στιγμή, ή πολύ αυστηρά, όπως ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των υπολειμμάτων (διαφορά μεταξύ των μετρήσεων πεδίου και των αποτελεσμάτων του μοντέλου) θα πρέπει να είναι μια ελάχιστη προκαθορισμένη ή βέλτιστη τιμή.

Η αποδοχή της βαθμονόμησης μοντέλου της επαλήθευσης δεν σημαίνει απαραίτητα ότι επαληθεύεται το ίδιο το μοντέλο. Είναι πιθανό το μοντέλο να λειτουργεί σωστά υπό ορισμένες προϋποθέσεις, αλλά λανθασμένα υπό άλλες. Όσο το μοντέλο εφαρμόζεται σε διαφορετικές καταστάσεις σε διάφορες τοποθεσίες, αποκτάμε όλο και μεγαλύτερη εμπιστοσύνη σ' αυτό και στην ευρωστία του. Η

ακριβής στιγμή κατά την οποία το μοντέλο θεωρείται επαληθευμένο είναι τόσο δύσκολο να προσδιοριστεί, όσο και η στιγμή που ένας έφηβος γίνεται ενήλικος. Είναι μια σταδιακή διαδικασία. Όσο χρησιμοποιείται το μοντέλο, κάμπτεται όλο και περισσότερο και με διαφορετικούς τρόπους, θέτοντας σε δοκιμή την αξιοπιστία και την διατύπωση του. Εκ των υστέρων η λεπτομερής εξέταση των αποτελεσμάτων του μοντέλου αποτελεί μια σημαντική δοκιμή της χρησιμότητάς του. Οι εξετάσεις αυτές γίνονται αφού έχουν πραγματοποιηθεί οι προβλέψεις από το μοντέλο και καθώς τα δεδομένα γίνονται διαθέσιμα με την πάροδο του χρόνου. Ελάχιστα παραδείγματα μετέπειτα λεπτομερούς εξέτασης έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία και θεωρείται ότι χρειάζονται σίγουρα περισσότερα.

Η επαναλαμβανόμενη δοκιμή του μοντέλου είναι ζωτικής σημασίας στην απόκτηση εμπιστοσύνης προς το μοντέλο και στην κατανόηση των περιορισμών.

2.3 Μοντέλα χωρικής προσομοίωσης με την χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών

2.3.1 Εισαγωγή

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographic Information System – GIS) είναι ένα σύστημα αυτοματοποιημένης πληροφόρησης που είναι ικανό να συνθέτει, να αποθηκεύει, να ανακτά, να αναλύει και να εμφανίζει τα δεδομένα ενός χάρτη.

Μόλις πριν μια δεκαετία αυτή η τεχνολογία περιοριζόταν σε ένα μικρό αριθμό κολεγίων, πανεπιστημίων, σε τοπικούς φορείς και ομοσπονδιακές αντιπροσωπείες. Σήμερα έχει διαδοθεί ευρέως σε όλο τον κόσμο και έχει μεγάλη εφαρμογή σε πολλούς τομείς όπως κοινωνικές αναλύσεις, έρευνες περιβάλλοντος, δημογραφικές μελέτες, ανάλυση μέσων μεταφοράς κ.α. Όμως η μεγαλύτερη εφαρμογή του είναι η υποστήριξη στην λήψη αποφάσεων.

Τα γεωγραφικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται από το GIS συλλέγονται από υπάρχοντες χάρτες, αεροφωτογραφίες, δορυφόρους και άλλες πηγές. Στην συνέχεια για να γίνουν τα δεδομένα συμβατά με τον υπολογιστή λαμβάνει χώρα η ψηφιοποίηση. Με την διαδικασία της ψηφιοποίησης επιτυγχάνεται μια μετατροπή η οποία επιτρέπει την περαιτέρω λειτουργία της αποθήκευσης, ανάκτησης και ανάλυσης των δεδομένων από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι χάρτες που παράγονται από το GIS τυπικά εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή και τυπώνονται σε χαρτί. Το GIS επεξεργάζεται και άλλες μορφές γραφικών όπως αυτοματοποιημένα σε περιβάλλον Cad. Έτσι το GIS είναι κάτι περισσότερο από ένα σύστημα δημιουργίας χαρτών. Είναι ένα σύνθετο εργαλείο που παρέχει στους χρήστες του την δυνατότητα να ερμηνεύουν και να εκτιμούν σωστά μια διαμορφωμένη κατάσταση λαμβάνοντας πλήρη πληροφόρηση (ESRI, ARC-VIEW, 1996).

Το GIS αντιπροσωπεύει με μεγάλη ακρίβεια την επιφάνεια της γης και τα δεδομένα που ανάλογα με την περίπτωση αναλύει. Έτσι συχνά αναβαθμίζεται και συμπληρώνεται με διάφορα εργαλεία επεξεργασίας και εμφάνισης των δεδομένων.

Με την χρήση του δίδονται απαντήσεις σε γεωγραφικά και χωρικά προβλήματα. Τα εισερχόμενα δεδομένα προς επεξεργασία, η ανάλυση τους και το εξαγόμενο αποτέλεσμα είναι η απάντηση του προβλήματος. Ο σκοπός της συλλογής των δεδομένων για το GIS είναι:

- A. Η καταγραφή μιας ορισμένης γεωγραφικής περιοχής
- B. Η εξέταση διάφορων υποθέσεων και η κατασκευή μοντέλων.

Τα δεδομένα του GIS περιλαμβάνουν δεδομένα χάρτου (απεικόνιση μιας περιοχής) και δεδομένα κάποιου χαρακτηριστικού. Κατά την διάρκεια της ανάλυσης

τα δεδομένα του χάρτη συνδέονται με τα δεδομένα του χαρακτηριστικού με αυτοματοποιημένη εκτέλεση .

Για να μπορέσει να γίνει δυνατή η προσέγγιση των σχέσεων, των αλληλεξαρτήσεων και αλληλεπιδράσεων μεταξύ ποσοτικών και ποιοτικών στοιχείων και χαρακτηριστικών της φυσικής και της κοινωνικοοικονομικής πραγματικότητας μιας περιοχής αλλά και η εκτίμηση του μέτρου, των μεγεθών και των τάσεων μεταβολών τους, οι ερευνητές είναι υποχρεωμένοι να συνεκτιμήσουν ή να συγκρίνουν πολλά και ποικίλα συνήθως ετερογενούς ακρίβειας και μεγάλων μεταξύ τους χρονικών αποκλίσεων στοιχεία όπως: τοπογραφικά διαγράμματα, θεματικούς χάρτες, αεροφωτογραφίες και επίγειες φωτογραφίες, στατιστικές απογραφές, πληροφορίες από φωτοερμηνευτικές αναλύσεις και ψηφιακές επεξεργασίες τηλεπισκοπικών απεικονίσεων κλπ., καθώς και στοιχεία ειδικών βάσεων δεδομένων όπως για παράδειγμα μετεωρολογικά και υδρολογικά δεδομένα (Χριστοδουλάκη Σ,2002).

Η ιδιαιτερότητα στις βάσεις δεδομένων σε έργα που σχετίζονται με τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και την διαχείριση των φυσικών κινδύνων και καταστροφών οφείλεται στη γεωγραφική εξάρτησή τους. Παίζει δηλαδή σημαντικό ρόλο η χωρική διάσταση των πληροφοριών και η γεωγραφική τους κατανομή. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Δυνατότητα γεωγραφικής ανάλυσης των πληροφοριών
- Δυνατότητα ηλεκτρονικής χαρτογράφησης και παρουσίασης θεματικών χαρτών
- Δυνατότητα διεπιστημονικής εργασίας

- Δυνατότητα ένταξης μεθόδων μαθηματικής επεξεργασίας των πληροφοριών στα Γ.Π.Σ καθώς και μοντέλα προσομοίωσης.

Αντίθετα με έναν χάρτη εγγράφου, ένας χάρτης GIS μπορεί να συνδυάσει πολλά επίπεδα πληροφοριών. Είναι πολύ απλό να χρησιμοποιηθεί ένας χάρτης εγγράφου. Ο ίδιος αποτελεί μια αντιπροσώπευση των πόλεων και των δρόμων, των βουνών, των ποταμών, των σιδηροδρόμων και των πολιτικών ορίων. Αντίθετα με έναν χάρτη εγγράφου, ένας χάρτης GIS μπορεί να συνδυάσει πολλά επίπεδα πληροφοριών είναι δυνατό να αποτελεί μια πλήρη αντιπροσώπευση των πόλεων και των δρόμων, των βουνών και των ποταμών, των σιδηροδρόμων και των πολιτικών ορίων και άλλων στοιχείων ανάλογα με την ανάλυση που επιδιώκεται και τα στοιχεία της ανάλυσης αυτής. Συνήθως οι πόλεις αντιπροσωπεύονται από μικρά σημεία ή κύκλους, οι δρόμοι από μαύρες γραμμές, οι αιχμές βουνών από μικροσκοπικά τρίγωνα και οι λίμνες από μικρές μπλε περιοχές.

Η διαφορά είναι ότι αυτές οι πληροφορίες προέρχονται από μια βάση δεδομένων και παρουσιάζονται μόνο εάν ο χρήστης επιλέγει να την παρουσιάσει. Η βάση δεδομένων αποθηκεύει το που βρίσκεται κάθε σημείο, πόσο μακρύς είναι ένας δρόμος ακόμη και πόσα τετραγωνικά χιλιόμετρα καταλαμβάνει μια λίμνη (Κουτσόπουλος, 2005).

Κάθε τμήμα των πληροφοριών στο χάρτη τοποθετείται σε επίπεδο και οι χρήστες ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν τα επίπεδα αυτά σύμφωνα με τις ανάγκες τους. Ένα επίπεδο θα μπορούσε να αποτελείται από τους δρόμους μιας περιοχής, ενώ κάποιο άλλο θα μπορούσε να αντιπροσωπεύσει όλες τις περιφέρειες αλλά και τις λίμνες στην ίδια περιοχή. Ακόμα ένα άλλο θα μπορούσε να αντιπροσωπεύσει όλες τις πόλεις. Η δύναμη του GIS πέρα από τους χάρτες εγγράφου, είναι η δυνατότητα

της επιλογής των πληροφοριών που απαιτείται κάθε φορά να εμφανιστούν σύμφωνα με την εκάστοτε απαίτηση.

Οι λόγοι που χρήζουν τελικά το GIS ως ένα πολύτιμο εργαλείο παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Διαχείριση της οργάνωσης και των πόρων

Ένα από τα κύρια οφέλη του GIS είναι η βελτιωμένη διαχείριση της οργάνωσης και των πόρων. Το GIS μπορεί να συνδέσει τα σύνολα δεδομένων από τα κοινά ως προς την τοποθεσία δεδομένα, δημιουργώντας μια κοινή βάση δεδομένων, η επεξεργασία της οποίας είναι δυνατόν να διαφέρει σύμφωνα με την εκάστοτε μελέτη.

2. Λήψη καλύτερων αποφάσεων

Το GIS είναι μόνο ένα αυτοματοποιημένο σύστημα λήψης αποφάσεων, αλλά και ένα εργαλείο ερώτησης, ανάλυσης και παροχής δεδομένων χαρτών υπέρ της διαδικασίας λήψης απόφασης. Οι πληροφορίες μπορούν να παρουσιαστούν περιληπτικά και με σαφήνεια υπό μορφή χάρτη και συνοδευτικής έκθεσης, γεγονός που επιτρέπει στους υπεύθυνους στην κατανόηση των δεδομένων στην εστίαση των πραγματικών προβλημάτων που οδηγούν στην λήψη αποφάσεων για την επίλυσή τους.

2.3.2 Δημιουργία χαρτών

Η δημιουργία χαρτών με το GIS είναι πολύ πιο εύκολη από τις παραδοσιακές χειρωνακτικές ή αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις χαρτογραφίας. Το GIS δημιουργεί τους χάρτες από στοιχεία που προέρχονται από βάσεις δεδομένων. Οι υπάρχοντες χάρτες εγγράφου μπορούν επίσης να ψηφιοποιηθούν και να μεταφραστούν στο GIS. Η βασισμένη στο GIS χαρτογραφική βάση δεδομένων μπορεί να είναι και συνεχής και ελεύθερη σε κλίμακα. Τα προϊόντα χαρτών μπορούν έπειτα να δημιουργηθούν σε οποιαδήποτε θέση, σε οποιαδήποτε κλίμακα και δίνεται η δυνατότητα παρουσίασης

επιλεγμένων πληροφοριών που συμβολίζονται αποτελεσματικά για να δώσουν έμφαση στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Ένας χάρτης μπορεί να δημιουργηθεί οποτεδήποτε σε οποιαδήποτε κλίμακα, εφ' όσον υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα. Η διαφορά δεν είναι απλά αισθητική, είναι εννοιολογική. Το GIS δίνει τα εργαλεία σχεδιαγράμματος και σχεδίων που βοηθούν στην παρουσίαση γεγονότων με σαφήνεια. Τα σημαντικότερα από τα εργαλεία αυτά δίνονται παρακάτω:

A. Δουλεύοντας χωρικά

Το Arcmap μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιονδήποτε θέλει να εργαστεί χωρικά. Ένα κύριο χαρακτηριστικό του Arcmap είναι ότι είναι εύκολο να φορτωθούν τα συνοπτικά δεδομένα, όπως τα αρχεία dBase και δεδομένα από κεντρικούς υπολογιστές βάσεων δεδομένων στο Arcmap, ώστε να μπορεί να γίνει επίδειξη, σύνοψη και οργάνωση αυτών των δεδομένων γεωγραφικά. Σε σύντομο χρονικό διάστημα είναι εφικτό να εκτυπωθεί χάρτης υψηλών προδιαγραφών, η επεξεργασία είναι απλή και δίδεται η δυνατότητα γρήγορης αλλαγής συμβόλων, κλίμακας, τίτλων, εικόνων γραφημάτων κλπ. Το GIS ενσωματώνει γεωγραφικά και περιγραφικά δεδομένα, ενημερώνει δυναμικά τους χάρτες καθώς αλλάζουν τα δεδομένα, παρέχει εργαλεία δημιουργίας ερωτημάτων για την διερεύνηση των δεδομένων.

B. Επισκοπήσεις - Views

Με το Arcmap πραγματοποιούνται εργασίες με γεωγραφικά δεδομένα στους διαλογικούς χάρτες που ονομάζονται Views. Τα διάφορα θέματα μιας επισκόπησης (view) μπορεί να είναι σε μια από τις παρακάτω μορφές :

Τοξωτής μορφής επισκόπηση (ARC/VIEW shape), η οποία περιέχει γεωγραφικά χαρακτηριστικά και περιγραφικά δεδομένα τα οποία μπορούν να διορθωθούν μέσα από το περιβάλλον του Arcmap. Τα αρχεία αυτά δημιουργούνται

εξ' ολοκλήρου στο Arcmap, ή μπορούν να δημιουργηθούν από την μετατροπή άλλων θεμάτων του.

Κάλυψη πληροφοριών (Info coverage). Η κάλυψη πληροφοριών είναι μια βάση χωρικών δεδομένων που αποθηκεύει γεωγραφική και περιγραφική πληροφορία σε ένα σετ αρχείων.

Πλέγματα (Grids) τα οποία αποτελούνται από raster δεδομένα, κατάλληλα να περιγράψουν γεωγραφικά φαινόμενα τα οποία διαφέρουν συνεχώς στον χώρο, όπως το ψηφιακό μοντέλο εδάφους κλπ. Τα raster δεδομένα επεξεργάζονται από το Spatial Analyst.

Εικόνες αφού διορθωθούν πρώτα γεωμετρικά .

CAD αρχεία σχεδιαστικού προγράμματος (Autocad) εφόσον πρώτα διορθωθούν με την βοήθεια της επέκτασης Cad

INFO,DBASE,ASCII,SQL, αρχεία κειμένου

MAPINFO αρχεία εφόσον έχει φορτωθεί στο project η αντίστοιχη επέκταση.

Γ. Πίνακες -Tables

Οι πίνακες του Arcmap έχουν μια πλήρη σειρά των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων για τη λήψη των συνοπτικών στατιστικών, την ταξινόμηση και τη συζήτηση επάνω στην εκάστοτε εργασία. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν την περιγραφή των ιδιοτήτων ορισμένων σημείων γραμμών ή πολυγώνων που είναι σε μια View. Για παράδειγμα το πλάτος ενός δρόμου, ο κωδικός ενός οικοπέδου, το όνομα ενός ποταμού, ο κωδικός και το βάθος μιας γεώτρησης.

Δ. Διαγράμματα -Charts

Τα διαγράμματα του Arcmap προσφέρουν μια ισχυρή ικανότητα απεικόνισης επιχειρησιακών γραφικών παραστάσεων και δεδομένων που είναι πλήρως ενσωματωμένα στο γεωγραφικό περιβάλλον του Arcmap. Το Arcmap επιτρέπει την

εργασία ταυτόχρονα με τις γεωγραφικές και συνοπτικές παρουσιάσεις διαγραμμάτων των διαφόρων δεδομένων.

E. Χάρτες- Layouts

Με το έγγραφο αυτό γίνεται και η τελική εκτύπωση ενός χάρτη. Στο έγγραφο αποτυπώνονται τα περιεχόμενα μιας επισκόπησης (View), ενός Πίνακα και άλλες βοηθητικές πληροφορίες χρήσιμες για την τελική παραγωγή ενός χάρτη, όπως κλίμακες, φωτογραφίες, λεζάντες κλπ.

Στ. Κείμενα -Scripts

Στο παράθυρο γράφονται τα προγράμματα σε γλώσσα AVENUE.

Z. Σχέδια- Projects

Ένα σχέδιο- project είναι μια «δεξαμενή» στην οποία αποθηκεύονται όλα τα συστατικά του Arcmap οι επισκοπήσεις, οι πίνακες, τα διαγράμματα, οι χάρτες και τα κείμενα. Το παράθυρο του σχεδίου του Arcmap παρουσιάζει το περιεχόμενο του σχεδίου και καθιστά εύκολη την διαχείριση ολόκληρης εργασίας.

2.3.3 Το ArcGIS 9

Το ArcGIS 9 και η επέκταση του Spatial Analyst εξασφαλίζει εργαλεία για τα χωρικά δεδομένα τα οποία εφαρμόζουν στατιστική θεωρία και τεχνικές μοντελοποίησης για τα αναφερόμενα χωρικά δεδομένα.

Η θερμοκρασία, το υψόμετρο και οι συγκεντρώσεις ρυπογόνων ουσιών είναι τύποι δεδομένων οι οποίοι μπορούν να περιγραφούν από τις επιφάνειες. Κάθε κελί με κουκίδες – raster αντιπροσωπεύει μια μονάδα μέτρησης όπως τη σχέση του κελιού από σημείο με καθορισμένη τιμή μέτρησης. Επειδή δεν είναι πρακτικό να λαμβάνονται οι τιμές για κάθε κελί τύπου raster, από τιμές σε διάφορα σημεία δειγματοληψιών εξάγονται οι ενδιάμεσες τιμές χρησιμοποιώντας τα εργαλεία παρεμβολής του ArcGIS Spatial Analyst.

Το GIS παρέχει όλα τα μέσα για την διαχείριση, σύνθεση και ανάλυση των δεδομένων. Το ArcGIS Spatial Analyst (Χωρικός Αναλυτής) παρέχει ένα σύνολο εργαλείων για την ανάλυση και την μοντελοποίηση των χωρικών δεδομένων. Ένα σύνολο σημείων τα οποία εκπροσωπούν μεταβολές στο ανάγλυφο του εδάφους, στον πληθυσμό, ή στο περιβάλλον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απεικονίσει την συνέχεια και την διαφορετικότητα που παρατηρείται διαμέσου μιας επιφάνειας με τα εργαλεία της παρεμβολής. Αυτές οι μεταβολές μπορούν να εξαχθούν στον γεωγραφικό χώρο. Η μορφολογία και τα χαρακτηριστικά αυτών των μεταβολών μπορούν να περιγραφούν. Η ικανότητα να δημιουργηθούν επιφάνειες από μια σειρά δεδομένων από σταθμούς δειγματοληψίας κάνει την παρεμβολή δυναμική και χρήσιμη.

2.3.3.1 Επιφάνειες ερμηνείας.

Πριν περιγραφούν οι διάφορες τεχνικές παρεμβολής, είναι αναγκαίο να περιγραφούν οι διαφορετικές μεθοδολογίες επιφανειακής παρουσίασης. Κάθε μέθοδος παρουσίασης είναι χρήσιμη για τους δικούς της λόγους.

Οι συναρτησιακές επιφάνειες είναι δισδιάστατες και τρισδιάστατες και χρησιμοποιούνται για την παρουσίαση των χερσαίων επιφανειών με τις οποίες περιγράφονται οι γήινες επιφάνειες, στατιστικές επιφάνειες όπου αναλύονται δημογραφικά δεδομένα και μαθηματικές επιφάνειες όπου βασίζονται σε αριθμητικές παραστάσεις. Η παρουσίαση με βάση την επιφάνεια είναι η απλούστερη και πραγματοποιείται με την αποθήκευση της κάθε τοποθεσίας και της αντίστοιχης τιμής z ερμηνεύοντας την κάθε τοποθεσία δειγματοληψίας με την μεταβολή της τιμής του χαρακτηριστικού που αντιπροσωπεύει η παράμετρος z .

Οι ισοϋψείς ή ισοποσοτικές καμπύλες χρησιμοποιούνται για να οριοθετήσουν ένα κοινό χαρακτηριστικό κατά μήκος μιας γραμμής. Τεχνικά, οι ισοποσοτικές

συνδέουν τοποθεσίες με ίδια τιμή μιας παραμέτρου. Για παράδειγμα οι ισοϋψείς αντιπροσωπεύουν το ύψος, οι ισορυπαντικές μια οποιαδήποτε παράμετρο ρύπανσης κλπ.

Το **TIN** (Triangulate Irregular Network) είναι ένα τριγωνικό ακανόνιστο δίκτυο (**TIN**) διανυσματικών δεδομένων το οποίο χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και την επίδειξη επιφανειακών μοντέλων. Οι γεωγραφικές τριγωνικές διαιρέσεις χρησιμοποιούνται με ακανόνιστα σημειακά δεδομένα καθένα από τα οποία έχει x,y,z δεδομένα. Αυτά τα σημεία συνδέονται στις άκρες σχηματίζοντας τρίγωνα και δημιουργούν συνεχόμενη επιφάνεια σχηματίζοντας το ανάγλυφο του εδάφους.

Το πλέγμα τύπου **grid** είναι μια δομή η οποία ερμηνεύει τον χώρο σαν ένα πίνακα κελιών από ίσο μέγεθος τα οποία διευθετούνται σε γραμμές και στήλες. Στην περίπτωση που το πλέγμα grid αντιπροσωπεύει επιφάνεια, κάθε κελί περιέχει ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα που εκπροσωπεί την μεταβολή της τιμής z της παραμέτρου. Η θέση του κελιού στον γεωγραφικό χώρο εξασφαλίζεται από την συγκριτική θέση των γεωγραφικών συντεταγμένων του πλέγματος.

2.3.4 Μέθοδοι παρεμβολής

Για να δημιουργήσει το ArcGIS μια επιφάνεια τύπου πλέγματος grid η επέκταση Spatial Analyst, θέτει σε λειτουργία διάφορα εργαλεία παρεμβολής. Η παρεμβολή είναι μια διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται για να προβλέπει τις τιμές των κελιών σε θέσεις που στερούνται σημεία με τιμές κατόπιν δειγματοληψίας. Βασίζεται στην αρχή της χωρικής αυτοσυσχέτισης, η της χωρικής της εμπιστοσύνης οι οποίες υπολογίζουν τον βαθμό συσχέτισης και τους βαθμούς εμπιστοσύνης μεταξύ κοντινών ή απομακρυσμένων στόχων.

Η χωρική αυτοσυσχέτιση προσδιορίζεται εάν υπάρχει χωρικό υπόδειγμα. Αυτή η συσχέτιση χρησιμοποιείται για την μέτρηση :

- Της ομοιότητας των στόχων μέσα σε μια περιοχή
- Το βαθμός στον οποίο ένα χωρικό φαινόμενο συσχετίζεται στον χώρο
- Το επίπεδο της αλληλεξάρτησης μεταξύ των μεταβλητών
- Της φύσης και της δύναμης της αλληλεξάρτησης.

Οι διαφορετικές μέθοδοι παρεμβολής σχεδόν πάντα παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα.

Υπάρχουν δυο κατηγορίες τεχνικών παρεμβολής η αιτιοκρατική και η γεωστατιστική. Οι τεχνικές αιτιοκρατικής παρεμβολής δημιουργούν επιφάνειες βασισμένες σε μετρημένα σημεία ή μαθηματικούς τύπους. Μέθοδοι όπως αυτή των σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων IDW(Inverse Distance Weight) βασίζεται στην έκταση της ομοιότητας των κελιών ενώ μέθοδοι όπως η μέθοδος τάσης ταιριάζουν ένα επίπεδο επιφάνειας που καθορίζεται από μαθηματικές συναρτήσεις. Η γεωστατιστική παρεμβολή όπως η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής (Kriging) βασίζεται στην στατιστική και αποτελεί βελτιωμένη μέθοδο πρόβλεψης μοντέλων επιφάνειας καθώς περιλαμβάνει κριτήρια πρόβλεψης της βεβαιότητας και της ακρίβειας των προβλέψεων.

Τα χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας παρεμβολής μπορεί να ελεγχθούν περιορίζοντας τα εισαγόμενα σημεία τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εξερχόμενων τιμών των κελιών. Αυτό μπορεί να γίνει ελέγχοντας τον αριθμό των σημείων δειγματοληψίας ή της περιοχής από όπου προέρχονται τα σημεία της δειγματοληψίας. Καθορίζοντας τον μέγιστο αριθμό των σημείων λαμβάνεται ο μέγιστος αριθμός εξαγόμενων κελιών.

Πολλά εργαλεία παρεμβολής ενσωματώνουν barriers (εμπόδια), τα οποία καθορίζουν και ελέγχουν την συμπεριφορά επιφάνειας με όρους ομαλότητας και συνέχειας. Τα εμπόδια είναι αναγκαία διότι μερικές φορές οι διαδικασίες της

παρεμβολής δεν πρέπει να εκτελούνται εγκάρσια γραμμών, όπως είναι τα φράγματα, όρη και ποτάμια τα οποία δημιουργούν ασυνέχεια στην επιφάνεια.

2.3.5 Διαθέσιμες επιλογές παρεμβολής

Το ArcGIS 9 και η επέκταση του Spatial Analyst προσφέρουν αρκετά εργαλεία παρεμβολής που μπορεί να περιγράψουν και να καλύψουν μια επιφάνεια από σημειακά δεδομένα. Οι μέθοδοι των Δεικτών Pointerp, της Φυσικής Γειτνίασης Natural Neighbors , ενσωματώθηκαν στις μεθόδους των σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων IDW, της προσαρμογής Spline και της βέλτιστης παρεμβολής Kriging . Κάθε μέθοδος χρησιμοποιεί διαφορετική προσέγγιση για να καθορίσει τις τιμές των εξαγόμενων κελιών. Η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος εξαρτάται από την διανομή των σημείων δειγματοληψίας και το φαινόμενο το οποίο μελετάται.

2.3.6 Αιτιοκρατικές μέθοδοι παρεμβολής

2.3.6.1 Μέθοδος σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων (IDW)

(Inverse Distance Weight)

Η μεθοδολογία IDW είναι αναγκαίο να χρησιμοποιείται όταν τα σημεία δειγματοληψιών είναι αρκετά πυκνά για να καλύψουν την έκταση ολόκληρης της επιφάνειας. Η IDW μέθοδος καθορίζει την τιμή των κελιών με γραμμικό σταθμικό συνδυασμό επίδρασης των σημείων. Η προσδιοριζόμενη επιρροή είναι μια συνάρτηση της απόστασης ενός εισαγόμενου σημείου από την θέση του εξαγόμενου κελιού. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση τόσο μικρότερη επίδραση έχει στην τιμή του εξαγόμενου κελιού. Συνεπώς εκτιμά ότι κάθε σημείο δειγματοληψίας έχει μια τοπική επίδραση και η επίδραση αυτή μειώνεται σε απόσταση από το σημείο. Ο χρήστης καθορίζει τον αριθμό των σημείων ή όλα τα σημεία μέσα σε μια καθορισμένη ακτίνα και προάγει την διαδικασία υπολογισμού των τιμών. Στην IDW παρεμβολή η δύναμη ποικίλει αν και συνήθως η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη

προεπιλεγμένη τιμή είναι 2 (Ψιλοβίκος κ.α., 2006). Αυξάνοντας τη δύναμη δίδεται μεγαλύτερη επιρροή στα κοντινά σημεία, ενώ μειώνοντας την δύναμη δίδεται μεγαλύτερη επιρροή στα απομακρυσμένα σημεία. Η ακτίνα έρευνας μπορεί να οριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να καθορίζεται ο υπολογισμός μέσω των σημείων. Επίσης μπορεί να προστεθούν barriers για να περιορίσουν την χρήση των σημείων δειγματοληψίας από την μια πλευρά ως την άλλη (π.χ κορυφογραμμές, ποτάμια κλπ.) (Arc View 9 G.I.S, Help Manual, 2006).

2.3.6.2 Μέθοδος σπληνών (Splines)

Η μέθοδος σπληνών υπολογίζει τις τιμές χρησιμοποιώντας μια μαθηματική συνάρτηση η οποία ελαχιστοποιεί τις συνολικές καμπύλες της επιφάνειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε μια επίπεδη επιφάνεια οι καμπύλες να περνούν ακριβώς μέσα από τα σημεία δειγματοληψιών. Μπορεί να προβλέψει ράχες και κοιλάδες στα δεδομένα και είναι η καλύτερη μέθοδος αντιπροσώπευσης σε επιφάνειες χωρίς απότομες διακυμάνσεις-αιχμές.

Υπάρχουν δυο τύποι διαφοροποίησης των σπληνών ο "ομαλός" και "ο τεντωμένος". Μια ομαλή σπλήνα ενσωματώνει την πρώτη παράγωγο (κλίση), την δεύτερη παράγωγο (ρυθμός αλλαγής της κλίσης) και την τρίτη παράγωγο (ρυθμός αλλαγής της δεύτερης παραγώγου) ελαχιστοποιώντας τους υπολογισμούς. Αν και ο "τεντωμένος" τύπος χρησιμοποιεί μόνο την πρώτη και την δεύτερη παράγωγο, περιλαμβάνει περισσότερα σημεία στους υπολογισμούς των σπληνών, έτσι κατά συνήθεια δημιουργεί ομαλότερες επιφάνειες αλλά αυξάνει τον χρόνο υπολογισμού.

2.3.6.3 Μέθοδος Δεικτών -Pointerp

Είναι μια μέθοδο παρόμοια με την IDW η οποία επιτρέπει περισσότερο έλεγχο πάνω στην γειτνίαση των σημείων δειγματοληψίας. Η επίδραση ενός συγκεκριμένου σημείου δειγματοληψίας σε σχέση με την αξία του πλέγματος κελιού, εξαρτάται από

αν το σημείο της δειγματοληψίας είναι στην γειτνίαση του κελιού, και πόσο μακριά απέχει από το κελί παρεμβολής. Σημεία εκτός την γειτνίαση δεν έχουν καμιά επιρροή. Οι γειτνιάσεις μπορούν να έχουν σχήματα όπως κύκλοι, ακανόνιστα πολύγωνα, δακτυλίους ή γωνίες.

2.3.6.4 Μέθοδος Φυσικής Γειτνίασης (Natural Neighbor)

Η παρεμβολή τύπου Φυσικής Γειτνίασης **Natural Neighbor** έχει πολλά θετικά χαρακτηριστικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρεμβολή και την εξαγωγή συμπερασμάτων και γενικά λειτουργεί καλά σε ομάδα διασκορπισμένων σημείων. Συνεπώς αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται όταν έχουμε πολλά σημεία δειγματοληψιών.

2.3.7 Γεωστατιστικές – Στοχαστικές μέθοδοι παρεμβολής

2.3.7.1 Μέθοδος Βέλτιστης Παρεμβολής - Kriging

Είναι μια δυναμική στατιστική μέθοδος παρεμβολής η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές όπως στις ιατρικές επιστήμες, στη γεωχημεία, στην υπόγεια υδραυλική και στα μοντέλα ρύπανσης. Η μέθοδος Kriging υποθέτει ότι η απόσταση ή η διεύθυνση μεταξύ των μεθόδων δειγματοληψίας αντανακλά μια χωρική συσχέτιση η οποία μπορεί να ερμηνεύσει την μεταβολή στην επιφάνεια. Ταιριάζει μια συνάρτηση σε συγκεκριμένο αριθμό σημείων .

Οι προβλεπόμενες τιμές εξάγονται από το κριτήριο της σχέσης των σημείων δειγματοληψίας χρησιμοποιώντας σύνθετες σταθμικές τεχνικές μέσου. Χρησιμοποιεί μια ακτίνα έρευνας η οποία μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή.

Υπάρχουν αρκετοί τύποι Kriging. Ο συνηθισμένος τύπος λαμβάνει υπόψη ότι δεν υπάρχει σταθερός μέσος για τα δεδομένα πάνω από μια μέση περιοχή (δεν έχει τάση). Ο γενικός τύπος υποθέτει ότι υπάρχει τάση στα δεδομένα που μοντελοποιούνται.

2.3.7.2 Μέθοδος Τάσης (Trend)

Η μέθοδος τάσης είναι στατιστική μέθοδος η οποία εφαρμόζει μια πολυωνυμική εξίσωση σε ολόκληρη την επιφάνεια. Η επιφάνεια κατασκευάζεται έτσι ώστε σε κάθε εισαγόμενο σημείο, οι διαφορές ανάμεσα στις πραγματικές τιμές και τις τιμές αποτίμησης να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Είναι ένας ανακριβής παρεμβολέας και η επιφάνεια που προκύπτει σπάνια περνά διαμέσου των σημείων δειγματοληψίας. Συνεπώς η μέθοδος εντοπίζει τάσεις στα δεδομένα δειγματοληψίας και ομοιάζει με φυσικά φαινόμενα τα οποία διαφοροποιούνται ομαλά.

2.4 Μοντέλα χρονικής προσομοίωσης των μεταβολών της ποιότητας του νερού.

2.4.1 Εισαγωγή

Η συστηματική μέτρηση και καταγραφή των μεταβλητών που περιγράφουν την ποιότητα του νερού των επιφανειακών υδατικών πόρων σε μια υδρολογική λεκάνη, είναι απαραίτητη προκειμένου να σχεδιαστούν τα αντίστοιχα προγράμματα αειφορικής διαχείρισης. Στις αναπτυγμένες χώρες, όπου τα προβλήματα ρύπανσης του νερού εμφανίστηκαν από την δεκαετία του 50, η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού έχει καθιερωθεί νομοθετικά και στην πράξη και έχουν ήδη δημιουργηθεί τράπεζες δεδομένων, των οποίων η αναλυτική στατιστική επεξεργασία τεκμηρίωσε μια σειρά από προτάσεις και μέτρα θεραπείας, προστασίας, διατήρησης, διαχείρισης και προ πάντων πρόληψης της υποβάθμισης της ποιότητας του νερού.

Η εκτίμηση της ποιότητας του νερού από τα δεδομένα μακροχρόνιων μετρήσεων σε θέσεις των λιμνών γίνεται με στατιστική ανάλυση των δεδομένων των διαφόρων μεταβλητών ποιότητας χρησιμοποιώντας τις μεθόδους της περιγραφικής και συμπερασματικής στατιστικής ή με στοχαστικά μοντέλα που βασίζονται στην ιστορία των παραμέτρων και λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα των μετρήσεων και

την τυχαιότητα των παραμέτρων αυτών (Μήτσιου κ.α, 1999; Antonopoulos et al.,2001).

2.4.2 Στοχαστικά μοντέλα

Οι **στοχαστικές διαδικασίες** για την προσομοίωση χρονοσειρών χρησιμοποιήθηκαν συστηματικά από τους Box και Jenkins (1976), που παρουσίασαν την οικογένεια των γραμμικών στοχαστικών ομοιωμάτων που γνωστά σαν Box-Jenkins SARIMA (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average) ομοιώματα. Τα ομοιώματα Box – Jenkins έγιναν πολύ δημοφιλή εξαιτίας της απλής μαθηματικής δομής και της εφαρμογής τόσο σε στάσιμες όσο και σε μη στάσιμες διαδικασίες.

Μια διακεκριμένη χρονική σειρά $Z_1, Z_2, \dots, Z_{N-1}, Z_N$ που οι τιμές της αναφέρονται σε μηνιαίες τιμές της μεταβλητής ποιότητας ή ποσότητας του νερού (συγκέντρωση ή παροχή), κατά τους **Box Jenkins (1976)** μπορεί να προσομοιωθεί από ένα εποχιακό στοχαστικό **ARIMA**, της μορφής:

$$\phi(B)\Phi(B^S)(1-B)^d(1-B^S)^D(Z_t - \mu) = \theta(B)\Theta(B^S)e_t$$

όπου t είναι ο διακεκριμένος χρόνος, μ είναι ο μέσος όρος των τιμών της χρονικής σειράς Z_t , B είναι ο τελεστής οπίσω διαφορών ($BZ_t = Z_{t-1}$ και $B^SZ_t = Z_{t-s}$),

$e_t = \left[NID(0, \sigma_e^2) \right]$ είναι ο κανονικά ανεξάρτητα κατανεμημένος “λευκός θόρυβος”

των υπόλοιπων με μέσο όρο μηδέν και μεταβλητότητα σ_e^2 και S είναι το εποχιακό μήκος,

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$$

είναι ο μη εποχιακός τελεστής αυτοσυσχέτισης (AR) τάξης p $(1-B)^d$ είναι ο μη εποχιακός τελεστής διαφορών τάξης d που δημιουργεί μη εποχιακή στασιμότητα των d -οστών διαφορών όπου συνήθως $d=0, 1$ ή 2

$$\Phi(B^S) = 1 - \Phi_1 B^S - \Phi_2 B^{2S} - \dots - \Phi_p B^{pS}$$

είναι ο εποχιακός τελεστής αυτοσυσχέτισης (AR) τάξης P, $(1 - B^S)^D$ είναι ο εποχιακός τελεστής διαφορών τάξης D που δημιουργεί εποχιακή στασιμότητα των D-οστών διαφορών, όπου συνήθως D=0, 1 ή 2,

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$$

είναι ο μη εποχιακός τελεστής κινούμενων μέσων όρων (MA) τάξης q

$$\text{και } \theta(B^S) = 1 - \theta_1 B^S - \theta_2 B^{2S} - \dots - \theta_Q B^{QS}$$

είναι ο εποχιακός τελεστής κινούμενων μέσων όρων (MA) τάξης Q.

Ο γενικός συμβολισμός (p,d,q) (P,D,Q)s χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα εποχιακά ARIMA ομοιώματα. Για παράδειγμα ο συμβολισμός (1,1,2)(1,1,1)12 αντιπροσωπεύει το εποχιακό στοχαστικό ARIMA ομοίωμα

$$(1 - \phi_1 B)(1 - B)(1 - \Phi_1 B^{12})(1 - B^{12})(Z_t - \mu) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)(1 - \Theta_1 B^{12})_{et}$$

Για την δόμηση ενός μοντέλου ARIMA ακολουθούνται ορισμένα στάδια που είναι ο αρχικός προσδιορισμός της μορφής και των παραμέτρων, η εκτίμηση των παραμέτρων και ο έλεγχος της καταλληλότητάς τους. Ο αρχικός προσδιορισμός γίνεται με το αθροιστικό περιοδόγραμμα, τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και τη συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης. Η εκτίμηση των παραμέτρων γίνεται με την ελαχιστοποίηση των τετραγώνων των υπολοίπων χρησιμοποιώντας συνήθως τον αλγόριθμο του **Marquardt**. Ο έλεγχος της καταλληλότητας γίνεται με το αθροιστικό περιοδιόγραμμα, τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, τη συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης της χρονικής σειράς των υπολοίπων, τους ελέγχους **Portmanteau** και των κριτηρίων **AIC (Akaike's information Criteria)** και της μεταβλητότητας των υπολοίπων (σ_e^2). Η τιμή του ελέγχου **Portmanteau (Qp)** εκτιμάται από την σχέση:

$$Q_p = N \sum_{k=1}^k \tau_k^2$$

όπου N είναι ο αριθμός των τιμών της χρονοσειράς και τ_k είναι οι πρώτες k αυτοσυσχετίσεις. Το μοντέλο ARIMA είναι αποδεκτό, αν η τιμή του Q_p είναι μικρότερη από αυτή της χ^2 κατανομής για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για βαθμό ελευθερίας ίσο με τον αριθμό των μετατοπίσεων k .

Η εφαρμογή των μοντέλων προϋποθέτει στασιμότητα των χρονοσειρών που επιτυγχάνεται με διάφορους μετασχηματισμούς όπως είναι ο λογαριθμικός.

2.4.3 Ο έλεγχος των τάσεων

Ο έλεγχος των τάσεων των ποιοτικών μεταβλητών του νερού ενδιαφέρει πολύ τις περιβαλλοντικές επιστήμες. Οι διαδικασίες ανάλυσης της τάσης μιας μεταβλητής στηρίζονται στην παλινδρόμηση και τους ελέγχους των υποθέσεων. Ως ανεξάρτητη μεταβλητή χρησιμοποιείται συνήθως ο χρόνος, χωρίς να σημαίνει ότι η χωρική τάση ή η τάση κατεύθυνσης είναι μικρότερης σημασίας, ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι ανίχνευσης τόσο της αιφνίδιας (sudden), όσο και της βαθμιαίας χρονικής τάσης (Helsel and Hirsch, 1992).

Σκοπός του ελέγχου των τάσεων είναι να προσδιοριστεί αν οι καταγεγραμμένες για μια χρονική περίοδο, μετρήσεις μιας τυχαίας μεταβλητής π.χ. της συγκέντρωσης μιας χημικής ουσίας, αυξάνονται ή μειώνονται, δηλαδή αν η ποιότητα καλυτερεύει ή χειροτερεύει, με την πάροδο του χρόνου. Με στατιστικούς όρους δηλαδή ζητείται να προσδιοριστεί αν η κατανομή πιθανότητας του πληθυσμού, από τον οποίο προέρχονται οι μετρήσεις αυτές έχει μεταβληθεί με τον χρόνο και επιπλέον να περιγραφεί ο ρυθμός της μεταβολής, σε όρους μεταβολής κάποιας κεντρικής τάσης της κατανομής όπως η μέση τιμή ή η διάμεσος.

Ο έλεγχος είναι ιδιαίτερα δύσκολος στην περίπτωση της διερεύνησης της τάσης στις χρονοσειρές των ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ασύμμετρες κατανομές, απομονωμένες τιμές, εποχικότητα, ελλείπουσες τιμές και σειριακή συσχέτιση (Hirsch et al, 1982).

Οι έλεγχοι τάσης κατατάσσονται με βάση δυο παράγοντες. Ο πρώτος είναι το κατά πόσο ο έλεγχος είναι εντελώς παραμετρικός ή εντελώς μη παραμετρικός ή ένας συνδυασμός διαδικασιών. Ο δεύτερος αφορά στο αν έγινε προσπάθεια απάλειψης της διασποράς που οφείλεται σε άλλες σχετιζόμενες μεταβλητές που ονομάζονται εξωγενείς (exogenous) μεταβλητές. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο (διαδικασία) που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της τάσης, είναι απαραίτητο να προηγηθεί ο έλεγχος ύπαρξης τάσης, ο οποίος για την περίπτωση των μεταβλητών των υδατικών πόρων θα πρέπει να είναι μη παραμετρικός.

Ο έλεγχος ύπαρξης τάσης γίνεται με την χρήση της μεθόδου της συσχέτισης κατά τάξη μεγέθους του Spearman (Spearman's rank-correlation method) (Dahmen & Hall, 1990; Antonopoulos et al., 2001; Psilovikos et al., 2006), η οποία βασίζεται στο συντελεστή συσχέτισης Spearman που εκφράζεται με την σχέση:

$$R_{sp} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i D_i}{n(n^2 - 1)}$$

όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των δεδομένων, D η διαφορά και i είναι ο χρονολογικός αριθμός. Η διαφορά κάθε τάξης υπολογίζεται με $D_i = Kx_i - Ky_i$, όπου Kx_i είναι ο αριθμός χρονολογικής τάξης της παρατήρησης και Ky_i είναι η κατά τάξη μεγέθους σειρά των παρατηρήσεων y_i της μεταβλητής y . Η μηδενική υπόθεση **H₀:R_{sp}=0** (δεν υπάρχει τάση) ως προς την εναλλακτική υπόθεση **H₁:R_{sp}<>0(υπάρχει τάση)** ελέγχεται με την στατιστική δοκιμασία:

$$t_t = R_{sp} \left[\frac{n-2}{1-R_{sp}^2} \right]$$

όπου το t_t ακολουθεί Student's t κατανομή, με $v=n-2$ βαθμούς ελευθερίας και οι τιμές του για επίπεδο σημαντικότητας 5% δίνονται σε πίνακα (Dahmen and Hall, 1990). Έτσι η μηδενική υπόθεση γίνεται δεκτή, δηλαδή η χρονοσειρά δεν έχει τάση όταν η t_t που βρίσκουμε είναι μικρότερη από την τιμή t_t του πίνακα.

Για την προσομοίωση της τάσης δοκιμάζονται γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα. Η επιλογή του καλύτερα προσαρμοσμένου μοντέλου χρονικής τάσης γίνεται με την βοήθεια στατιστικών κριτηρίων όπως είναι το **μέσο σφάλμα (ME)**, το **μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE)**, το **μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)** και το **μέσο απόλυτο επί τοις εκατό % σφάλμα (MAPE)** (Makridakis et al, 1986). Όσο πιο κοντά στο μηδέν βρίσκεται η τιμή του **ME** και όσο πιο μικρές είναι οι τιμές των **MSE**, **MAE** και **MAPE**, τόσο καλύτερο είναι το μοντέλο χρονικής προσομοίωσης.

Εφόσον υπάρχουν δεδομένα μιας υδρολογικής παραμέτρου για μεγάλο χρονικό ορίζοντα είναι δυνατόν εφόσον γίνει ο έλεγχος τάσεων και διαπιστωθεί η ύπαρξή της να ελεγχθούν στην συνέχεια μια σειρά από μοντέλα με στόχο την επιλογή του καλύτερα εφαρμοσμένου. Τα συνηθέστερα μοντέλα που εξετάζουμε είναι το γραμμικό το πολυωνυμικό και το λογαριθμικό ενώ υπάρχουν το εκθετικό και το υπερβολικό όπως δίνονται στις παρακάτω σχέσεις (Psilovikos et al., 2006) :

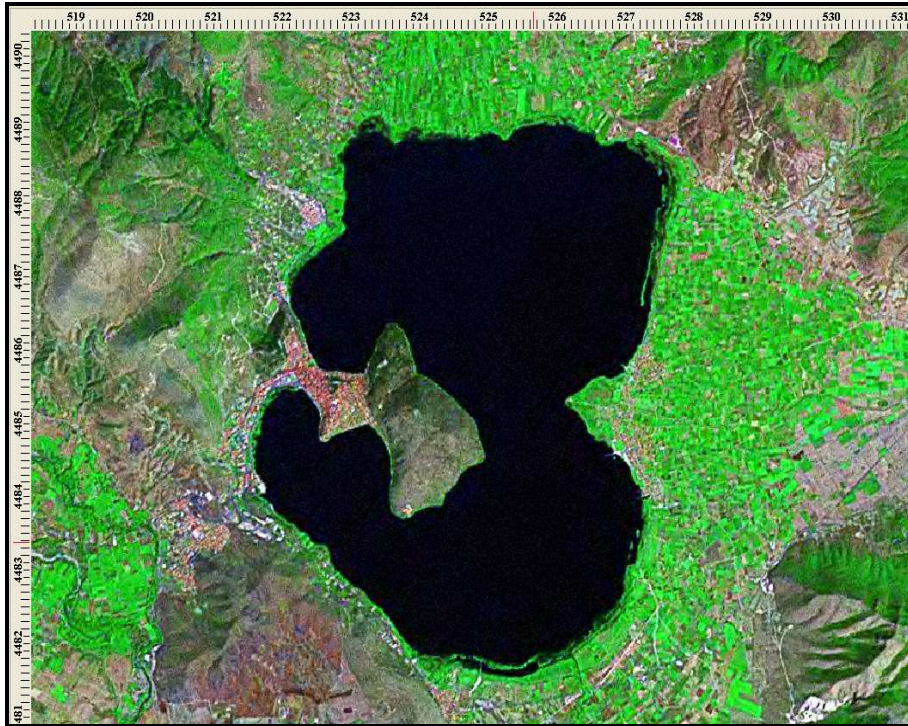
Γραμμικό	$F = \alpha + b \cdot T$
Τετραγωνικό	$F = \alpha + b \cdot T + c \cdot T^2$
Λογαριθμικό	$F = \alpha \cdot \ln(T) + b$
Εκθετικό	$F = \alpha \cdot e^{b \cdot T}$
Υπερβολικό	$F = \alpha \cdot T^b$

Οι ποιοτικές παράμετροι που αναλύονται ορίζονται σύμφωνα με την δυνατότητα συγκέντρωσής των δεδομένων τους στο χρόνο αλλά και την σημαντικότητα του καθενός για την εξαγωγή συμπερασμάτων χρήσιμων για την ταυτοποίηση της ποιοτικής κατάστασης του νερού.

2.5 Η περιοχή έρευνας της λίμνης Καστοριάς Ορεστιάδα

2.5.1 Γεωγραφικά στοιχεία

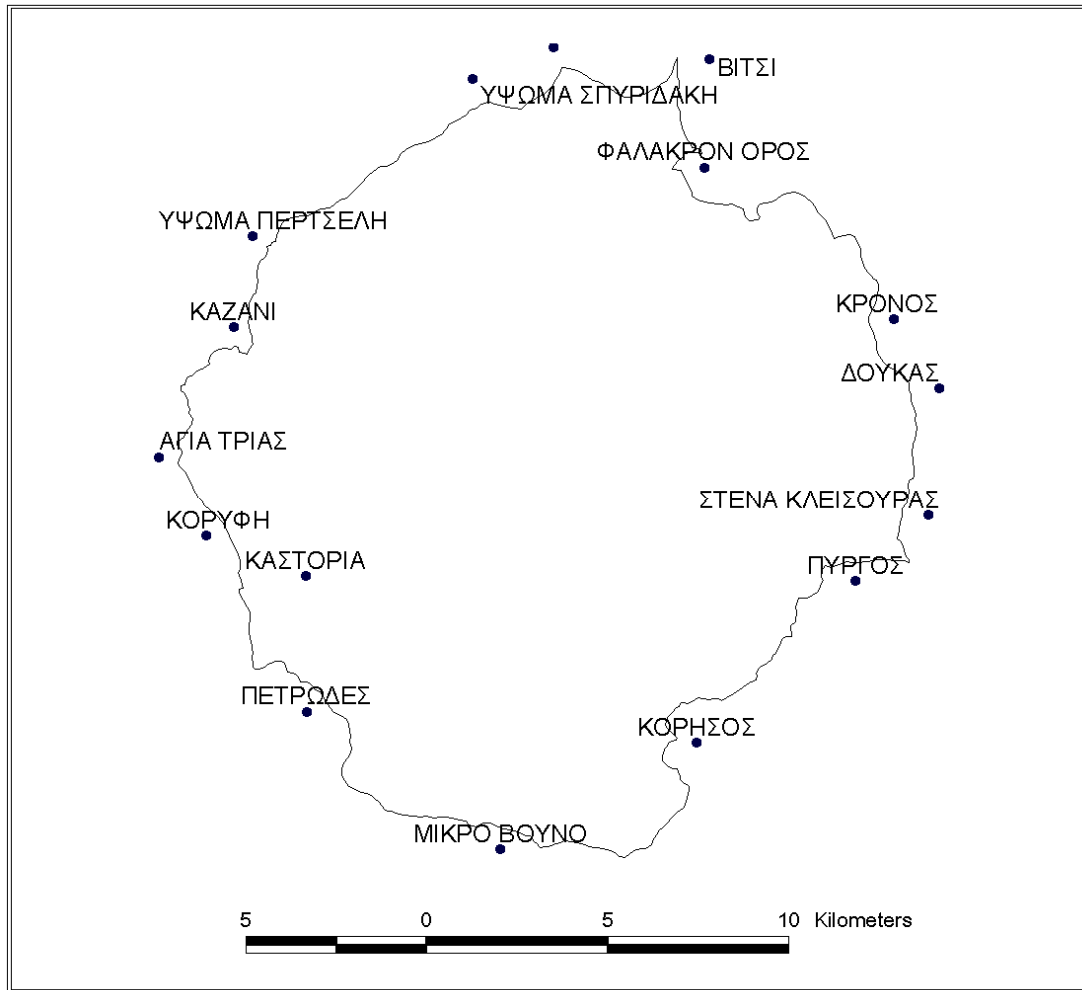
Η λίμνη της Καστοριάς βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος Β $40^{\circ}31'$ και γεωγραφικό μήκος $21^{\circ}18'$ όπως φαίνεται στη δορυφορική εικόνα 15. Υπολογίζεται ότι σχηματίστηκε πριν από 10.000.000 χρόνια κατά το Μειόκαινο και η σημερινή της μορφή αποτελεί κατάλοιπο μιας παλιότερης εκτεταμένης λίμνης με έκταση 164 τετραγωνικά χιλιόμετρα και βάθος που ξεπερνούσε τα 50 μέτρα. Θεωρείται λίμνη καρστική, τεκτονικής προέλευσης με σημερινή έκταση 27,9 τετραγωνικά χιλιόμετρα και βάθος που δεν ξεπερνά τα 10 μέτρα. Το υπερθαλάσσιο υψόμετρο της είναι περίπου 630 μέτρα και έχει νεφροειδές σχήμα, που οφείλεται στην εισχώρηση μιας λοφώδους χερσονήσου της χερσονήσου της Κορίτσας στο εσωτερικό της. Το ανάπτυγμα των ακτών της είναι περίπου 31 χιλιόμετρα και ο όγκος των νερών της $110 \cdot 10^6$ κυβικά μέτρα (Βαφειάδης, 1983).



Εικόνα 15 Δορυφορική εικόνα της λίμνης της Καστοριάς(Πηγή: NASA, Έτος 2000 Προβολή WGS '84)

2.5.2 Υδρογεωμορφολογικά στοιχεία

Η λεκάνη απορροής που τροφοδοτεί τη λίμνη με τα νερά της έχει έκταση περίπου 263 τετραγωνικά χιλιόμετρα και οριοθετείται από βόρεια από το όρος Βέρνο που έχει υψηλότερη κορυφή το Βίτσι (2128 m) και είναι το υψηλότερο σημείο της λεκάνης απορροής, καθώς και άλλα χαμηλότερα υψώματα. Νότια τα όρια της λεκάνης οριοθετούνται από τα υψώματα Πετρώδες (802m), Μικρό βουνό (804m) και Κορησός (1.386m). Ανατολικά από τα υψώματα Φαλακρό (1.862m), Κρόνος(1680m), Δούκας, Μαυροβούνι, Στενά Κλεισούρας(1.150m) και Πύργος(1.413m). Τέλος το δυτικό όριο της λεκάνης απορροής αποτελείται από τα υψώματα Κορυφή (1.100m), Αγία Τριάδα(1.387m), Καζάνι (1380m) και Περτσέλη (1.505m) (Εικόνα 16).



Εικόνα 16 Όρια λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς (Ζαρκάδας, 2005).

Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροή της λεκάνης ανέρχεται σε 895m, το δε απόλυτο υψόμετρο κυμαίνεται από ελάχιστη τιμή 629,80m (μέση στάθμη της λίμνης) μέχρι μέγιστη τιμή 2.128m(κορυφή όρους Βέρνου).

Θεωρητικά η λεκάνη απορροής της λίμνης της Καστοριάς είναι μια κλειστή λεκάνη με υδροκρίτη όπως ορίστηκε παραπάνω και συνολική επιφάνεια έκτασης 281 km^2 . Εξαιτίας της διάνοιξης με φυσικές διεργασίες του ρέματος Γκιόλι το νότιο τμήμα του υδροκρίτη μετατοπίστηκε κατά μεγάλο μέρος με αποτέλεσμα η έκταση της λεκάνης απορροής να περιοριστεί τελικά σε 263,6 Km^2 .

Καθώς υπάρχουν καρστικοποιημένα ανθρακικά πετρώματα στην Νοτιοανατολική και Δυτική περιοχή της λεκάνης απορροής, η υπόγεια λεκάνη

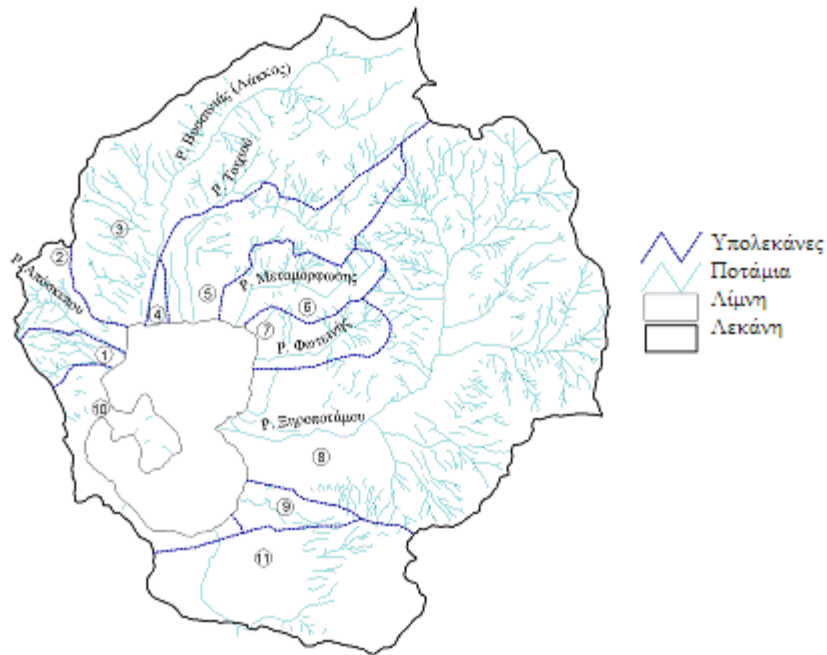
απορροής της λίμνης είναι περισσότερο εκτεταμένη (Βαφειάδης, 1983) και καταλαμβάνει έκταση 301 km².

Μικρή δασοκάλυψη με κυριαρχία πλατύφυλλων ειδών και υποβαθμισμένων θαμνώνων χαρακτηρίζει το ορεινό τμήμα της λεκάνης απορροής της λίμνης, ενώ οι μικρές εκτάσεις με κωνοφόρα που υπάρχουν οφείλουν την ύπαρξή τους στις προστατευτικές αναδασώσεις που κατά καιρούς έχει δημιουργήσει η δασική υπηρεσία. Στο χαμηλό λοφώδες και πεδινό τμήμα της λεκάνης απορροής κυριαρχούν οι αγροτικές καλλιέργειες, ενώ σημαντικό του τμήμα καλύπτεται από οικισμούς και αστικές περιοχές (Εικόνα 17).



Εικόνα 17 Πανοραμική θέα της λίμνης .

Η λεκάνη απορροής της λίμνης περιέχει εννέα ρέματα, που καταλήγουν σ' αυτή και την τροφοδοτούν σ' όλη τη διάρκεια του χρόνου με τα νερά τους (Εικόνα 18). Το πιο σημαντικό είναι το ρέμα του Ξηροπόταμου που εκβάλλει ανάμεσα στα δημοτικά διαμερίσματα Πολυκάρπης και Μαυροχωρίου του Δήμου Μακεδνών. Το ρέμα αυτό συνεισφέρει τις μεγαλύτερες ποσότητες νερού στη λίμνη αλλά και φερτών υλικών.



Εικόνα 18 Ρέματα που εκβάλλουν στην λίμνη καθώς και οι υπολεκάνες της (Π. Ζαρκάδας 2005).

Το δέλτα που έχει σχηματιστεί από τις προσχώσεις του Ξηροποτάμου τα παλαιότερα χρόνια έχει εισχωρήσει βαθιά μέσα στη λίμνη και έχει μειώσει σημαντικά την απόσταση ανάμεσα στις απέναντι όχθες της. Στο ανατολικό τμήμα υπάρχουν ακόμη τα ρέματα της Φωτεινής και του Ίστακου. Τα ρέματα του Απόσकेπου και του Φουντουκλή βρίσκονται στο δυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής, ενώ τέσσερα ρέματα της Μεταμόρφωσης, του Τοιχιού, του Αγίου Αθανασίου και της Βουσιτιάς καταλαμβάνουν το βόρειο τμήμα της λεκάνης. Στο νότιο μέρος δεν υπάρχει ρέμα που να εκβάλλει στη λίμνη. Αντίθετα το ρέμα Γκιόλι αποφορτίζει την περίσσεια των νερών της λίμνης, αφού αποτελεί τη φυσική έξοδο των νερών προς τον ποταμό Αλιάκμονα.

Η λεκάνη απορροής της λίμνης είναι δυνατόν να υποδιαιρεθεί όπως φαίνεται στον πίνακα 8 σε 11 υπολεκάνες απορροής, από τις οποίες στις εννέα πρώτες υφίστανται διαμορφωμένα υδατορεύματα. Η υπολεκάνη 10 περιλαμβάνει την πόλη

της Καστοριάς και την περιοχή μέχρι και το χωριό Δισπηλιό. Οι απορροές της υπολεκάνης αυτής εισέρχονται στη λίμνη μέσω των αγωγών όμβριων υδάτων (όπου υπάρχουν) ή κατά τρόπο διάχυτο μέσω περιστασιακών μικρορευμάτων κατά μήκος της ακτής της λίμνης. Η υπολεκάνη 11 περιλαμβάνει την περιοχή Αμπελοκήπων και συμβάλλει στη λίμνη μόνο μέσω υπογείων απορροών. Οι επιφανειακές απορροές εμποδίζονται να εισέλθουν στην λίμνη λόγω του υπερυψωμένου οδοστρώματος της δημοσίας οδού Δισπηλιού-Κορησού, οδηγούνται προς την Διώρυγα Καστοριάς (Ρέμα Γκιόλι) και εκεί απορρέουν μέσω αυτής προς τον ποταμό Αλιάκμονα (Εικόνα 19).



Εικόνα 19 Τρισδιάστατη απεικόνιση της λεκάνης απορροής με το Υδρογραφικό Δίκτυο (Ζαρκάδας, 2005)

Πίνακας 8 Ρέματα και υπολεκάνες της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς

A/A	Περιοχή ή Υπολεκάνη	Έκταση (km ²)
1	Ρ.Φουντουκλή	4,23
2	Ρ.Αποσκέπου	7,97
3	Ρ.Βυσσινιάς	48,19
4	Ρ.Αγ.Αθανασίου	2,11
5	Ρ.Τοιχιού	23,10
6	Ρ.Μεταμόρφωσης	11,98
7	Ρ.Φωτεινής	8,53
8	Ρ.Ξηροποτάμου	112,55
9	Ρ.Ιστάκου	5,56
10	Ρ.Καστοριάς-Δισπηλιού	11,51
11	Ρ.Αμπελοκήπων (εκβάλλει στο Ρ. Γκιόλι)	17,27
	Σύνολο έκτασης	$253,00 - 17,27 = 235,73$
	Έκταση λίμνης Καστοριάς	27,90
	Σύνολο λεκάνης απορροής μαζί με την επιφάνεια της λίμνης	263,63

2.6.3 Γεωλογικά στοιχεία

Η περιοχή χαρακτηρίζεται κυρίως από ανθρακικά πετρώματα που εμφανίζονται στις ημιορεινές και ορεινές περιοχές και από αλλουβιακές αποθέσεις που χαρακτηρίζουν τις πεδινές περιοχές. Τα κυριότερα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής είναι τα εξής (Εικόνα 20):

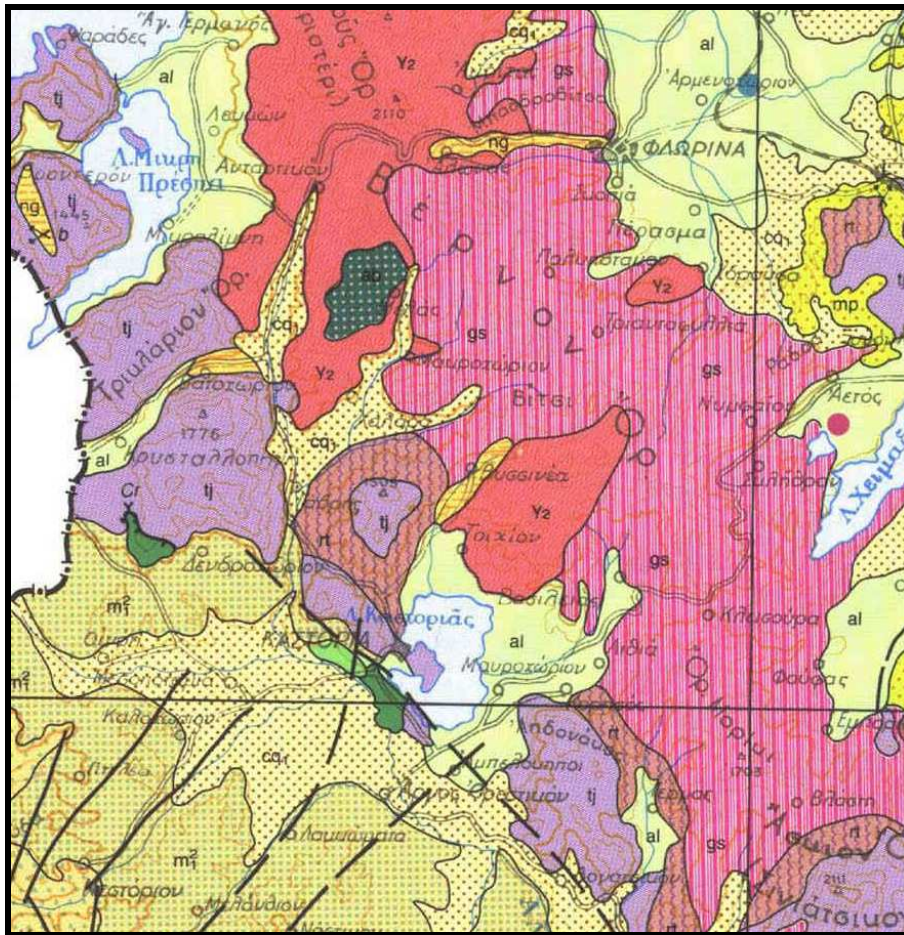
Ολόκαινο- Πλειστόκαινο -Νεογενές: Αλλουβιακές αποθέσεις ασύνδετων υλικών και δελταικές προσχώσεις στα σημεία εκβολής των χειμάρρων που

εμφανίζονται στα πεδινά γύρω από την λίμνη και εκατέρωθεν των χειμάρρων στις περιοχές με ήπιες κλίσεις. Ελώδεις περιοχές εμφανίζονται στο βόρειο τμήμα της λίμνης.

Μέσο – Ανώτερο Τριαδικό: Ασβεστόλιθοι και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι μεσοστρωματώδεις και παχυστρωματώδεις ανοικτότεφρου και τεφρού χρώματος, που εμφανίζονται κυρίως στο δυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής.

Κατώτερο Τριαδικό: Ελαφρά μεταμορφωμένα πετρώματα με παρεμβολές από φακούς ερυθρών κρυσταλλικών ή μη ασβεστόλιθων. Αρχίζουν με μετακροκαλοπαγείς μεταψαμμίτες και μεταρκόζες που μεταβαίνουν βαθμιαία προς τα πάνω σε φυλλίτες κατά θέσεις πρασινόλιθους και σχιστόλιθους διαφόρων τύπων. Τα πετρώματα αυτά εμφανίζονται κυρίως στο βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής.

Παλαιοζωικό: έντονα μεταμορφωμένο σύστημα γνεύσιων σχιστόλιθων και αμφιβολίτων που παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη , κυρίως στο ανατολικό και βόρειο τμήμα της λεκάνης απορροής. Διακρίνονται δυο ορίζοντες, από τους οποίους ο ανώτερος περιλαμβάνει κυρίως σχιστόλιθους και ο κατώτερος γνεύσιους με παρεμβολές σχιστόλιθων. Επίσης, στην περιοχή εμφανίζονται και γρανιτογνεύσιοι της Δυτικής Μακεδονίας , οι οποίοι έχουν γνευσιακή έως σχιστοποιημένη υφή. Στην πεδινή περιοχή των χειμάρρων πραγματοποιούνται αμμοληψίες για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής.



Εικόνα 20 Ο γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της Καστοριάς (IGME)

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

al	Ολόκαινο (Αλλούβιο) Σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιες αποθέσεις. Τύρφη Φιλιππίνων (Tb).	rt	Περμοτριάδικό Ασβεστόλιθοι, γραουβάκες, σχιστόλιθοι πρασινίτες, ηφαιστίτες
tj	Τριαδικό (;) – Λιάσιο Ασβεστόλιθοι φάσσεως «Παντοκράτορος».	C₂	Κενομάνιο – Μαιστρίχτιο Ασβεστόλιθοι (βιομικρουδίτες, βιοσπαρουδίτες, βιομικρίτες).
Οξίνα Y₂	Γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες	οφ	Διαβάσεις, περιδοτίτες, σερπεντινίτες, οφιόλιθοι
gs	Οφθαλμογενέσιοι, γενέσιοι, σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες Στην Πελαγονική, Παλαιοζωικοί – Τριαδικοί	ng	Νεογενές (αδιαίρετο) Λιμναίες αποθέσεις: ψαμμίτες, μάργες, άργιλοι, μερικές φορές με στρώματα λιγνίτη. Λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις: ιζήματα κλαστικά όπως τα παραπάνω (κυρίως μολάσσα).

Όσο αφορά την σεισμικότητα της περιοχής , αναφέρεται ότι σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό η περιοχή της Καστοριάς ανήκει στην πρώτη ζώνη, δηλαδή στις περιοχές με την μικρότερη επικινδυνότητα στην χώρα.

2.5.4 Υδρογεωλογικά στοιχεία

Η υδρολιθολογική συμπεριφορά των ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών εξαρτάται από την πετρολογική σύσταση, την κοκκομετρική σύσταση, τον βαθμό διαγένεσεως την τεκτονική καταπόνηση και το βαθμό διαρρήξεως και αποσαθρώσεως των πετρωμάτων (Βαφειάδης, 1983).

Για την περιγραφή της υδρογεωλογικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, οι γεωλογικοί σχηματισμοί χωρίζονται σε τρεις βασικές ομάδες.

- Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τα μεταμορφωμένα, ημιμεταμορφωμένα και γρανιτογενευστικά πετρώματα του υπόβαθρου.
- Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από τα ανθρακικά μεσοζωικά πετρώματα με την καρστική υδρογεωλογική συμπεριφορά τους
- Στην τρίτη ομάδα περιλαμβάνονται οι κοκκώδεις σχηματισμοί, δηλαδή τα μολαστικά ιζήματα και οι χαλαρές τεταρτογενείς αποθέσεις.

Από την μελέτη των πηγών που εμφανίζονται στα μεταμορφωμένα, ημιμεταμορφωμένα και γρανιτογενευστικά πετρώματα της περιοχής, διαπιστώνεται ότι οι σπουδαιότερες, από πλευράς παροχής , εκδηλώνονται κατά μήκος ρηγμάτων στις περιοχές Βασιλειάδας και Βιτσίου και γενικά σε ζώνες έντονα διερρηγμένες. Επίσης τα γενεσιογρανιτικά και τα ισχυρά μεταμορφωμένα σκληρά σχιστολιθικά πετρώματα, παρουσιάζονται πιο μακροδιαπερατά από τα ασθενώς μεταμορφωμένα ή ημιμεταμορφωμένα φυλλιτικά πετρώματα. Πράγματι καμιά πηγή με αξιόλογη παροχή δε διαπιστώθηκε στα φυλλιτικά πετρώματα της περιοχής.

Η ανισοτροπία της περατότητας είναι γνωστό φαινόμενο των ασβεστολιθικών πετρωμάτων. Τα καρστικά νερά κυκλοφορούν εκλεκτικά από ρωγμές, κοιλώματα, σχισμές κτλ. που δεν έχουν κλείσει με αργιλικό ή ασβεστιτικό υλικό. Στους ασβεστόλιθους της περιοχής μελέτης, οι δευτερογενείς περατότητες κυρίως η κατακόρυφη, αλλά και η οριζόντια είναι υψηλή.

Το επίπεδο βάσεως της ασβεστολιθικής εμφανίσεως δυτικά της λίμνης συνδέεται οπωσδήποτε με την ύπαρξη της λίμνης. Δεν είναι όμως γνωστό μέχρι ποιο βάθος κάτω από την λίμνη προχωρεί η καρστικοποίηση στους ασβεστόλιθους αυτούς. Το πιθανότερο είναι να καταλήγει ως το υδατοστεγές παλαιοζωικό υπόβαθρο το οποίο δεν βρίσκεται πολύ βαθιά.

Οι καρστικοί ασβεστόλιθοι Κορησού βυθίζονται προς Δ, ΒΔ, δεν είναι όμως γνωστό αν αυτοί αποτελούν συνέχεια των ασβεστόλιθων Καστοριάς και αν μέρος των καρστικών νερών τους εκφορτίζεται απ' ευθείας στην λίμνη. Πάντως από υδρογεωλογικές μετρήσεις δεν συνεπάγεται και τέτοιο. Απόδειξη αποτελούν οι πηγές του Ίστακου και Μηλίτσας σε υψόμετρα μέχρι 24 m πάνω από την στάθμη της λίμνης. Όμως μπορούμε να ισχυριστούμε έμμεσα μέσω των προσχωσιγενών υδροφόρων της πεδινής περιοχής Αμπελοκήπων – Κρεπενής υπάρχει υδραυλική συνάφεια των καρστικών αυτών νερών με την λίμνη αφού τροφοδοτούν πλευρικά τα αλλούβια (Βαφειάδης, 1983).

Από τα λιθολογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία γεωτρήσεων που έγιναν στα ιζήματα αυτά διαπιστώνεται ότι στην πλειονότητα επικρατούν τα λεπτόκοκκα αργιλομαργαϊκά ιζήματα, ενώ το πάχος των αδρομερών διαπερατών στρωμάτων είναι μικρό και οι παροχές των εγκλωβισμένων υδροφόρων οριζόντων περιορισμένες. Οι μικρές παροχές εξηγούνται από τις χαμηλές περατότητες των υδροφόρων που είναι κατά βάση ψαμμίτες ή συμπαγοποιημένοι άμμοι στο μικρό πάχος των υδροφόρων

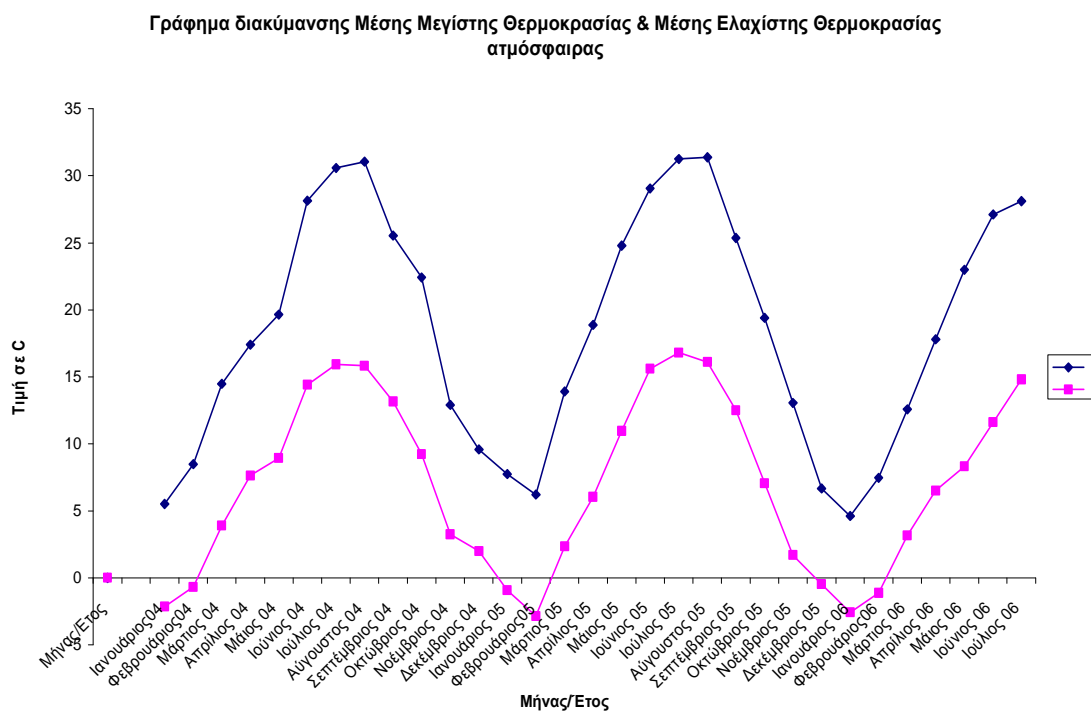
στρωμάτων στις πυκνές αποσφηνώσεις τους και στις δυσμενείς συνθήκες τροφοδοσίας τους.

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις παρουσιάζουν υδρογεωλογική συμπεριφορά ανάλογα με την θέση, το πάχος και την κοκκομετρική τους σύσταση. Το πάχος τους ποικίλει, γενικά αυξάνει από τις παρυφές της πεδινής εκτάσεως προς το κέντρο της.

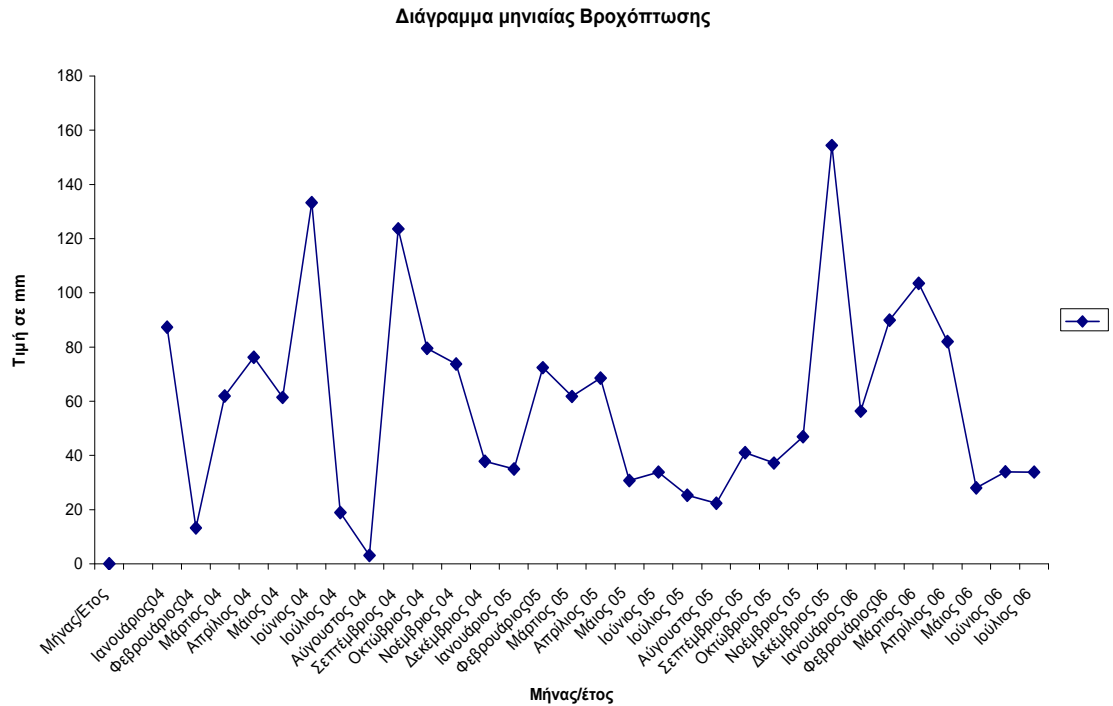
2.5.5 Κλιματικά χαρακτηριστικά

Το κλίμα του Νομού, λόγω του υψομέτρου και του ανάγλυφου του εδάφους, είναι ηπειρωτικό με ιδιαίτερα βαρύ χειμώνα. Ο ηπειρωτικός αυτός χαρακτήρας γίνεται εντονότερος όσο αυξάνεται το υψόμετρο, με χαρακτηριστική την βαθμιαία μεταβολή των κλιματολογικών συνθηκών.

Στα παρακάτω διαγράμματα (εικόνες 21 και 22), παρουσιάζονται οι μέσες υψηλότερες και οι μέσες χαμηλότερες μηνιαίες θερμοκρασίες για την περιοχή κατά την περίοδο Ιανουάριος 2004 έως Ιούλιος 2006.



Εικόνα 21 Γράφημα μέσης μεγίστης και μέσης ελαχίστης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας από τον Ιανουάριο του 2004 έως τον Ιούλιο του 2006



Εικόνα 22 Γράφημα μηνιαίας βροχόπτωσης από τον Ιανουάριο του 2004 έως τον Ιούλιο του 2006

Επιπρόσθετα, χαρακτηριστικά του κλίματος του Νομού αποτελούν οι ανοιξιιάτικοι παγετοί και οι χαλαζοπτώσεις που προκαλούν ζημιές στις δενδροκαλλιέργειες της περιοχής. Χιονοπτώσεις λαμβάνουν χώρα κυρίως τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο ενώ μικρότερης έκτασης χιονοπτώσεις λαμβάνουν χώρα τους μήνες Δεκέμβριο και Μάρτιο. Οι βροχές είναι συνήθως μεγάλης διάρκειας, οι τιμές του ετήσιου βροχομετρικού ύψους που σημειώνονται κυμαίνονται από 500 -900 mm / έτος και η κατανομή των βροχών στην διάρκεια του έτους ακολουθεί τον μεσογειακό τύπο κλίματος, δηλ. η ξηρή περίοδος συμπίπτει με την θερμή με μια τάση κατανομής των βροχών στην διάρκεια του έτους (χαρακτηριστικό δεύτερου μέγιστου τον Μάιο – Ιούνιο). Μετά τον Απρίλιο και κατά το θέρος οι βροχές είναι συνήθως καταρρακτώδεις, και μερικές φορές με μορφή χαλαζιού. Περισσότερο χαλαζόπληκτες περιοχές είναι οι ΒΑ παραλίμνιες και τα υψίπεδα.

Η ατμοσφαιρική υγρασία είναι μεγάλη κατά τους χειμερινούς μήνες, μέτρια την άνοιξη και το φθινόπωρο, μικρή κατά το θέρος.

Οι νεφοσκεπείς ημέρες μπορεί να διαδέχονται η μία την άλλη για μεγαλύτερες περιόδους από την νοτιότερη χώρα.

Οι επικρατούντες άνεμοι είναι Β – ΒΔ και ψυχροί στον χειμώνα, μάλλον μικρής έντασης, ενώ το καλοκαίρι επικρατούν οι ΝΔ και σπανιότεροι Α.

Οι παγετοί είναι πολλοί κατά τους χειμερινούς μήνες, με ελάχιστη επίδραση στις καλλιέργειες, που είναι προσαρμοσμένες σε τέτοιες συνθήκες. Κατά την διάρκεια της άνοιξης συμβαίνουν συχνοί όψιμοι παγετοί που πολλές φορές προκαλούν ζημιές στην γεωργία.

Τα νερά της βροχής και οι χιονοπτώσεις που είτε καταλήγουν με την επιφανειακή απορροή στη λίμνη είτε πέφτουν απ' ευθείας στην επιφάνειά της, αποτελούν σύμφωνα με τους ειδικούς την κύρια πηγή τροφοδοσίας της. Τέλος μεγάλος (κατά την παράδοση) αριθμός υπολίμνιων πηγών τροφοδοτούν με τα νερά τους τη λίμνη Καστοριάς. Οι πηγές αυτές είναι δυνατόν να γίνουν αντιληπτές το χειμώνα που η λίμνη παγώνει, αφού στα σημεία που εμφανίζονται είτε δεν επιτρέπουν το σχηματισμό πάγου, είτε το στρώμα πάγου που δημιουργείται είναι πολύ λεπτότερο. Η λίμνη σχεδόν κάθε χρόνο παγώνει για διάστημα που μπορεί να διαρκέσει από μια εβδομάδα έως και είκοσι μέρες ή και έναν μήνα ανάλογα με την βαρυχειμωνιά.

2.5.6 Στοιχεία υδρολογίας επιφανειακού και υπόγειου υδατικού ισοζυγίου.

Αντικείμενο της υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς αποτελεί η εκτίμηση των φυσικών εισροών και εκροών στη λίμνη με την χρήση των υφιστάμενων υδρομετεωρολογικών και υδρομετρικών στοιχείων επεξεργασμένων μέσω μαθηματικών ομοιωμάτων.

Το υδατικό ισοζύγιο χρησιμοποιείται ως βασικό δεδομένο στο μαθηματικό μοντέλο εκτίμησης της εισροής φερτών υλικών στην λίμνη. Υδρομετεωρολογικά στοιχεία των τελευταίων 30 χρόνων από το 1961 έως το τέλος του 1993 που προέκυπταν από 15 υδρομετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής της Λίμνης εισήχθησαν στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών στα πλαίσια του προγράμματος «Εξυγίανσης και αξιοποίησης της λίμνης Καστοριάς», ελήφθησαν οι ακόλουθες μέσες ετήσιες τιμές των εξής μεγεθών:

Θερμοκρασία αέρα:	12,5°C
Σχετική υγρασία:	62,3%
Εξάτμιση από την λίμνη:	832,2 mm ή $23,2 \times 10^6 m^3$
Μέση βροχόπτωση	
Στη λεκάνη Απορροής:	719,7 mm
Δυνητική εξατμισοδιαπνοή:	734,6 mm
Πραγματική εξατμισοδιαπνοή:	491,9 mm
Στάθμη της λίμνης:	629,79 mm

Από τις μετρηθείσες μέσες τιμές των παροχών των χειμάρρων που απορρέουν προς την Λίμνη κατά την διάρκεια του έτους, προκύπτουν οι παρακάτω τιμές της βασικής απορροής ανά υπολεκάνη πίνακας 9:

Πίνακας 9 Βασικής απορροής ανά υπολεκάνη

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	ΒΑΣΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ
Φουντουκλή	0,028
Απόσκεπος	1,8
Βυσσινιάς	6,6
Τάφος Αγίου Αθανασίου	1,1
Τοιχίο	2,5
Μεταμόρφωση	1,1
Φωτεινή	0,054
Ίστακος	2,9
Ξηροπόταμος	5,4
Σύνολο	21,5

Από μαθηματικό μοντέλο βροχής-επιφανειακής απορροής (Τολίκας κ.α,2000) προκύπτουν οι παρακάτω τιμές επιφανειακής απορροής για κάθε υπολεκάνη Πίνακας 10:

Πίνακας 10 Τιμών επιφανειακής απορροής ανά υπολεκάνη βάσει μοντέλου

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ
Φουντουκλή	1,04
Απόσκεπος	2,46
Βυσσινιάς	6,33
Τάφος Αγίου Αθανασίου	1,79
Τοιχίο	7,01
Μεταμόρφωση	5,21
Φωτεινή	0,96
Ίστακος	2,14
Ξηροπόταμος	5,06
Σύνολο	32,0

Ο υπόγειος υδροφορέας φορτίζει ετήσια κατά μέσο όρο τη λίμνη με $28,6 \cdot 10^6 m^3$ νερού.

Συνεπώς από τα παραπάνω προκύπτει το εξής ισοζύγιο της λίμνης (Τολίκας κ.α, 2000):

Μέση βροχόπτωση στην λεκάνη

Απορροής της λίμνης : 787,6 mm

Πραγματική εξατμισοδιαπνοή : 570,2 mm

Επιφανειακή απορροή προς τη

λίμνη : 108,1 mm

Υπόγεια απορροή προς τη

Λίμνη : 96,6 mm

Βασική απορροή : 72,6 mm

Από τις παραπάνω τιμές προκύπτει ότι το άθροισμα της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, της επιφανειακής απορροής και της υπόγειας απορροής προς την λίμνη είναι 774,9mm. Η διαφορά των 12,7mm απο τη μέση βροχόπτωση στη λεκάνη

απορροής της λίμνης είναι η επιφανειακή απορροή κατευθείαν προς το ρέμα Γκιόλι, δηλαδή προς την έξοδο της λεκάνης απορροής.

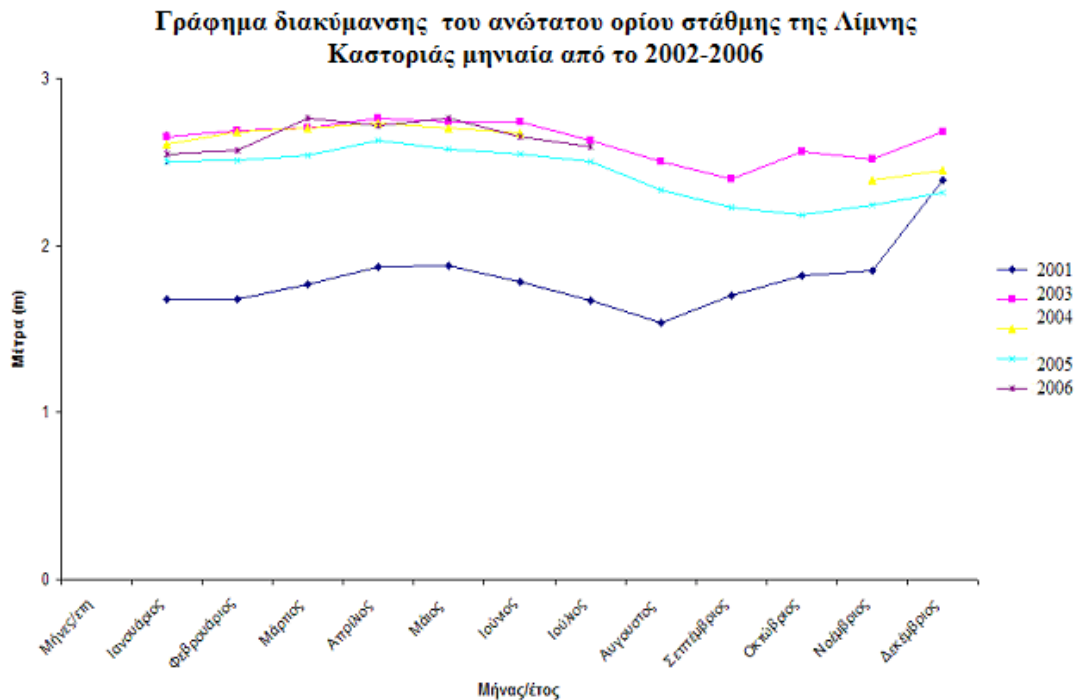
Η βασική απορροή περιλαμβάνει και ένα μέρος της υπόγειας ροής το οποίο λίγο πριν την λίμνη, στις εκβολές των χειμάρρων, βγαίνει επιφανειακά.

2.5.7 Λιμνολογικά χαρακτηριστικά

Η σύνθεση του νερού το οποίο συγκεντρώνεται στη λεκάνη μιας λίμνης είναι κυρίως το αποτέλεσμα τριών παραγόντων (Βαφειάδης, 1983):

1. των φορτίων κατακρήμνισης και του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη απορροής
2. της γεωλογικής σύνθεσης των πετρωμάτων
3. του γεωμορφολογικού ανάγλυφου της λεκάνης απορροής.

Το νερό της λίμνης περιέχει χιλιάδες διαλυμένες ενώσεις που υφίσταται συνεχείς μετατροπές, καθώς η χημική ένωση του νερού λειτουργεί ως άριστος διαλύτης. Στην εικόνα 23 παρουσιάζεται η διακύμανση του ανώτατου ορίου της στάθμης της λίμνης Καστοριάς που σημειώθηκε κάθε μήνα από το μήνα Ιανουάριο του 2002 έως και τον Ιούλιο του 2006. Είναι αναγκαίο να αναφέρουμε ότι κατά τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο του 2004 δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Επίσης η στάθμη υπερχείλισης της λίμνης είναι 2,90m.



Εικόνα 23 Γράφημα μηνιαίας διακύμανσης του ανώτατου ορίου στάθμης νερού από το 2002 έως το 2006

2.5.8 Η χρήση νερού της λίμνης

Εξαιτίας της αυξημένης παράκτιας γεωργικής δραστηριότητας αυξάνονται οι ανάγκες σε ποτιστικό νερό. Για να καλυφθούν λοιπόν αυτές αντλείται νερό για άρδευση από τη λίμνη.

Η αλιεία στη λίμνη της Καστοριάς αποτελούσε έως το 1994 σημαντική δραστηριότητα και ήταν ένα από τα σημαντικότερα παραδοσιακά κέντρα της ενδοχώρας. Εκτός από την επαγγελματική αλιεία ασκούσαν σε μεγάλη κλίμακα και η ερασιτεχνική. Η μέση ετήσια αλιευτική απόδοση της λίμνης έφθανε περίπου τα 78 kg για κάθε εκτάριο. Σταδιακά η αλιευτική απόδοση της λίμνης ελαττώθηκε με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επαγγελματική αλιεία στην περιοχή μετά το 1997. Στον πίνακα φαίνεται η παραγωγή ψαριών από την λίμνη Καστοριάς κατά είδη την τελευταία πενταετία σύμφωνα με τα δηλωθέντα αλιεύματα στο Δήμο Καστοριάς. Τα στοιχεία αυτά εκφράζονται σε κιλά και αποτελούν το 25%-30% της πραγματικής

αλιευτικής παραγωγής, όπως φαίνονται στον πίνακα 11 (Τμήμα Αλιείας-Υδ/γειών Ν. Α Καστοριάς).

Πίνακας 11 Ετήσια παραγωγή αλιευμάτων σε Kg.

Είδος ψαριού	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Γριβάδι	174	-	-	-	-	15
Τσουκάνι	-	-	-	-	-	-
Πρική	679	360	-	-	-	30
Γουλιανός	180	-	-	-	-	-
Γλήνι	-	-	-	-	-	-
Πλατίκα	750	-	-	-	-	-
Τσιρόνι	-	-	-	-	-	-
Κέφαλος	-	-	-	-	-	-
Χέλι	-	-	-	-	-	-
Τούρνα	90	10	-	-	-	20
Πεταλούδα	63.260	1.000	2.300	1.000	-	2.770
Ηλιόψαρο	-	-	-	-	-	-
Σύνολο	65.133	1.370	2.300	1.000	0	3.005

Σήμερα στην προσπάθεια ενίσχυσης των φυσικών αποθεμάτων πραγματοποιούνται εμπλουτισμοί με ιχθύδια γηγενών ειδών γριβαδιού (*Cyprinus carpio*) και Γληνιού (*Tinca tinca*).

Όσον αφορά την αναψυχή η λίμνη αποτελεί πόλο έλξης των κατοίκων της περιοχής αλλά και τουριστών. Εκτός από τη δυνατότητα περιηγήσεων στη λίμνη με ειδικό караβάκι του δήμου Καστοριάς, πραγματοποιούνται και κωπηλατικοί αγώνες σε κωπηλατοδρόμιο που βρίσκεται στη νότια παραλία της λίμνης.

2.5.9 Νομοθετικές ρυθμίσεις και Διεθνείς Συμβάσεις για την Προστασία του περιβάλλοντος στην περιοχή έρευνας.

Οι κυριότερες εθνικές ρυθμίσεις που έχουν σκοπό την προστασία και την ανάδειξη του φυσικού περιβάλλοντος της λίμνης συνοψίζονται στα εξής:

1. Η περιοχή της λίμνης έχει κηρυχθεί από το 1974 ως μνημείο φυσικού κάλλους
2. Η ζώνη γύρω από την λίμνη έχει χαρακτηριστεί από το 1987 σύμφωνα με το Γενικό Πολεοδομικό σχέδιο (Γ.Π.Σ) της πόλης της Καστοριάς σαν ειδική ζώνη προστασίας ακτών.
3. Επίσης σύμφωνα με το Προεδρικό διάταγμα Περί Ζωνών Οικιστικού Ελέγχου (ΖΟΕ) (ΦΕΚ 125/δ/21-2-1986) έχουν καθοριστεί οι χρήσεις γης γύρω από την λίμνη.
4. Σε όλη την έκταση τη λίμνης και της παραλίμνιας περιοχής απαγορεύεται το κυνήγι και η Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρία την έχει συμπεριλάβει στον κατάλογο των Σημαντικών Περιοχών για τα Πουλιά της Ελλάδας και της Ευρώπης (SPA) και μόλις το 2001 έγινε η πρόταση αυτή αποδεκτή από το ΥΠΕΧΩΔΕ.

Σύμφωνα με την Κοινοτική Νομοθεσία αλλά και τις διεθνείς συμβάσεις που η εφαρμογή τους αφορά την λίμνη της Καστοριάς ιδιαίτερη σημασία έχουν:

1. Η σύμβαση της Βέρνης (1979), για την διατήρηση της άγριας ζωής και του Φυσικού Περιβάλλοντος της Ευρώπης αφού αρκετά από τα είδη της περιοχής της λίμνης περιλαμβάνονται στους αντίστοιχους καταλόγους.
2. Η σύμβαση της Βόννης (1979) , για την διατήρηση των μεταναστευτικών ειδών άγριων ζώων , αφού η λίμνη της Καστοριάς φιλοξενεί κάθε χρόνο αρκετά μεταναστευτικά είδη που περιλαμβάνονται στους καταλόγους της σύμβασης αυτής.

3. Η κοινοτική οδηγία 79/409 της ΕΟΚ για την διατήρηση των άγριων πουλιών
4. Η οδηγία 92/43 της ΕΟΚ για την διατήρηση των φυσικών οικοτόπων και της άγριας πανίδας και αυτοφυούς χλωρίδας. Η οδηγία αυτή ήταν ο πρόδρομος της δημιουργίας του δικτύου Natura 2000 στον οποίο εντάχθηκε και η λίμνη της Καστοριάς.
5. Η λίμνη της Καστοριάς εντάχθηκε στο Ευρωπαϊκό Δίκτυο Natura 2000 καταχωρημένη με τον κωδικό GR 1320001.

2.5.10 Συνοπτική περιγραφή των υφισταμένων πηγών ρύπανσης

Σε γενικές γραμμές το φυσικό και δομημένο περιβάλλον του δήμου Καστοριάς βρίσκεται σε ικανοποιητική κατάσταση. Τα προβλήματα που υπάρχουν εντοπίζονται κυρίως στο λιμναίο οικοσύστημα, στις επιπτώσεις της δόμησης, στο παραδοσιακό πολεοδομικό σύνολο, σε μπαζώματα ρεμάτων και σποραδικές αλλοιώσεις τοπίου.

Η λίμνη υπήρξε για μεγάλο διάστημα αποδέκτης αστικών λυμάτων και φορτίων από τις παρακείμενες γεωργικές εκμεταλλεύσεις, με συνέπεια την επικίνδυνη υποβάθμιση της ποιότητας των νερών. Οι ακτές της δέχθηκαν επίσης τις συνέπειες από ανεξέλεγκτες χρήσεις και δόμηση που αλλοίωσαν ή και κατέστρεψαν την αισθητική τους αξία και την οικολογική τους λειτουργία. Με τα μέτρα που έχουν ληφθεί, όπως η διοχέτευση των αστικών λυμάτων στη Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων του Δισπηλιού και οι προστατευτικές ρυθμίσεις των ΖΟΕ (Ζώνη Οικιστικού Ελέγχου), θα περιορίσουν σε σημαντικό βαθμό τις αιτίες περιβαλλοντικής υποβάθμισης. Ειδικότερα στην προστασία θα συμβάλλει το «Πρόγραμμα αντιμετώπισης Ειδικών Περιβαλλοντικών Προβλημάτων, Οριοθέτηση του Υγροβιότοπου της Λίμνης Καστοριάς και Ευρύτερης Περιοχής του» (Εcos Μελετητική ΕΠΕ,1997) με τις ρυθμίσεις και τη λειτουργία του σχετικού Φορέα

Διαχείρισης που προβλέπει. Ενώ το εν λόγω πιλοτικό έργο επίσης, αναμένεται να έχει θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο λιμναίο οικοσύστημα.

Όσον αφορά το αστικό περιβάλλον, ο τρόπος δόμησης στις παλαιότερες περιοχές έχει επιφέρει αρνητικές και εν πολλοίς μη αντιστρεπτές συνέπειες. Η εντατική εκμετάλλευση του αστικού εδάφους σε ένα δύσκολο φυσικό ανάγλυφο δημιούργησε θύλακες με υψηλές πυκνότητες, δυσχερείς προσπελάσεις, έλλειψη ελεύθερων χώρων και ανεπαρκή κοινωνική υποδομή. Η δόμηση αυτή είχε σαν αποτέλεσμα την καταστροφή σε μεγάλο ποσοστό του αρχιτεκτονικού πλούτου και του αρχικού πολεοδομικού ιστού και την αλλοίωση της πολιτιστικής ταυτότητας της πόλης.

Στον εξωαστικό χώρο, κυρίως κατά μήκος του κυρίου οδικού δικτύου, παρατηρείται μια τάση εγκατάστασης διαφόρων αστικών δραστηριοτήτων (εμπορικές εκθέσεις, εργαστήρια και συνεργεία, ξενοδοχειακές μονάδες κ.α.) με τρόπο που δεσμεύουν τα αποθέματα γης και περιορίζουν τις προοπτικές μιας σχεδιασμένης αστικής ανάπτυξης. Επίσης, στην κατανάλωση αποθεμάτων περιαστικής γης συμβάλλει και η τάση κατασκευής κατοικιών σε μεγάλα κτήματα προς την περιοχή του Απόσκεπου και Κεφαλαρίου, και μάλιστα παρά την ύπαρξη διαθέσιμης οικοπεδικής γης στις περιοχές των επεκτάσεων.

Επίσης αξιοσημείωτες είναι οι επεκτάσεις των καλλιεργειών, οι εκχερσώσεις και τα μπαζώματα για τη διάνοιξη δρόμων σε βάρος του υδροβιότοπου.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί η κακή αντιμετώπιση σημαντικών ρεμάτων (όπως για παράδειγμα στην περιοχή του Φουντουκλή) εξαιτίας της οποίας, πέρα από καταστροφή των υπόγειων αποδεκτών των όμβριων υδάτων, δημιουργούνται εστίες αισθητικής, και όχι μόνο, ρύπανσης με την απόθεση μπαζών, σκουπιδιών κλπ.

2.5.10.1 Αξιολόγηση των επιβαρύνσεων

- **Απορρίμματα**

Στο νομό υπήρχαν 30 καθορισμένοι χώροι απόρριψης των απορριμμάτων και πάνω από 33 ανεξέλεγκτης απόρριψης. Πολλές κοινότητες είχαν σαν χώρους διάθεσης των απορριμμάτων τις όχθες των ποταμών με αποτέλεσμα να υπάρχει ρύπανση των επιφανειακών αλλά και των υπόγειων νερών.

- **Λύματα – Απόβλητα**

Σε μεγάλο ποσοστό η υγιεινή των ανεπεξέργαστων λυμάτων και των λοιπών ακάθαρτων υδάτων καλύπτονταν μέχρι πρόσφατα με απορροφητικούς βόθρους λόγω της καρστικής φύσης του εδάφους. Τα αστικά λύματα της πόλης της Καστοριάς και των παραλίμνιων κοινοτήτων καθώς και τα απόβλητα από τις γεωργοκτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις αποτελούν τη βασική αιτία για την περιβαλλοντική υποβάθμιση της λίμνης.

Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις σε συνδυασμό με τη φυσική γήρανση της λίμνης έχουν ως συνέπεια την διατάραξη της οικολογικής ισορροπίας και των βιολογικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών της. Το 1991 ξεκίνησε στο Νομό Καστοριάς η λειτουργία της μονάδας βιολογικού καθαρισμού των αποβλήτων.

Τα αστικά λύματα συγκεντρώνονται από τον κεντρικό παραλίμνιο αγωγό και μεταφέρονται στην εγκατάσταση του βιολογικού καθαρισμού, ο οποίος βρίσκεται στην περιοχή του Δισπηλιού. Σήμερα καθημερινά δέχεται 6.000 m^3 αστικών λυμάτων από τον Δήμο Καστοριάς αλλά και από τους γύρω παραλίμνιους Δήμους (Δήμο Μακεδνών και Δήμο Βιτισίου).

Η διάθεση του κύριου όγκου των αστικών λυμάτων του Δήμου Καστοριάς ακολουθεί την παραπάνω διαδρομή, όμως σήμερα υπάρχουν ακόμη λίγοι απορροφητικοί βόθροι σε λειτουργία. Τα πετρώματα στην πόλη της Καστοριάς είναι

ασβεστολιθικά με έντονα καρστικά φαινόμενα, ενώ το έδαφος όπου βρίσκονται οι περισσότερες κοινότητες είναι ιζηματογενές. Αποτέλεσμα της μορφολογίας του εδάφους είναι η ικανή απορροφητικότητα των βόθρων και για αυτό εξηγείται η πρόθεση πολλών κατοίκων να αποφεύγουν την σύνδεση των οικημάτων τους στο δίκτυο. Όμως καθώς η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι υψηλή κατά τόπους τα λύματα συχνά οδηγούνται στα υπόγεια νερά και την λίμνη.

Τα λύματα αποτελούν πηγή φωσφόρου καθώς ο φώσφορος εμπεριέχεται στα απορρυπαντικά τα οποία χρησιμοποιούνται για οικιακή χρήση. Βέβαια το έδαφος έχει μια αξιόλογη ικανότητα συγκράτησης του φωσφόρου, αλλά αν η παροχή των λυμάτων είναι συνεχής, το έδαφος κορένεται σε φώσφορο, ο οποίος διέρχεται πλέον μέσω αυτού. Έτσι βόθροι που υπάρχουν πλησίον της λίμνης διαθέτουν ποσότητες φωσφόρου που καταλήγουν στην λίμνη.

Πριν δέκα χρόνια κατέληγαν στην λίμνη και τα νοσοκομειακά λύματα, τα οποία οδηγούνται στον βιολογικό καθαρισμό από το 1995. Είναι αναγκαίο να σημειώσουμε ότι το φορτίο του φωσφόρου που έχει εναποτεθεί στην λίμνη, πριν την λειτουργία του βιολογικού καθαρισμού, με την απευθείας διόδευση των αστικών αποβλήτων στη λίμνη σε συνδυασμό με την τάση του λιμναίου οικοσυστήματος να αυτοκαθαρίζεται, συμπεραίνεται ότι ο χρόνος που απαιτείται για τη φυσική αποκατάσταση της λίμνης είναι σίγουρα μεγαλύτερος από τον χρόνο που απαιτήθηκε να φορτιστεί με ρυπογόνο υλικό.

2.5.10.2 Πηγές Ρύπανσης

Ρύπανση από μη σημειακές πηγές (non –point)

Η ρύπανση της λίμνης μέσω των διάχυτων πηγών οφείλεται στην είσοδο ρυπαντικών φορτίων μέσω της βροχόπτωσης είτε άμεσα απευθείας μέσω αυτής είτε έμμεσα με τις όμβριες απορροές.

Ρύπανση από όμβριες απορροές αστικών απορροών

Η ρύπανση από όμβριες απορροές αστικών απορροών περιλαμβάνει ουσίες που συσσωρεύονται στις επιφάνειες των αστικών περιοχών από επικάθηση σκόνης, ρίψη σκουπιδιών, διαρροές λαδιών αυτοκινήτων και μηχανημάτων, οικοδομικές εργασίες, πλύσιμο των υπαίθριων κοινόχρηστων χώρων με την χρήση απορρυπαντικών κτλ. Με την βροχή εκπλένονται και μεταφέρονται στο δίκτυο όμβριων. Το δίκτυο όμβριων δεν είναι συνδεδεμένο στον βιολογικό καθαρισμό με αποτέλεσμα οι ρυπογόνες ουσίες να καταλήγουν άμεσα στην λίμνη. Μερικές από αυτές τις ουσίες διαλύονται, ενώ άλλες αιωρούνται. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων αυτών στα πρώτα στάδια της βροχής βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα.

Βασικό γνώρισμα των όμβριων απορροών από αστικές περιοχές είναι ότι μεταφέρουν πολύ μεγάλα φορτία σε μικρά χρονικά διαστήματα. Πέρα από την ένταση, το μέγεθος των ετήσιων ρυπαντικών φορτίων από αστικές περιοχές είναι υψηλό, πράγμα ιδιαίτερα αρνητικό για την περίπτωση της λίμνης.

Ρύπανση από όμβριες απορροές υπαίθριων απορροών

Το έδαφος έχει την ικανότητα να συγκρατεί το φώσφορο. Όμως η περίσσεια ποσότητα του η οποία προκύπτει από την ευρεία χρήση του στα γεωργικά λιπάσματα, οδηγείται στο λιμναίο οικοσύστημα με την έκπλυση του εδάφους λόγω των βροχοπτώσεων.

Η αύξηση του ευτροφισμού της λίμνης της Καστοριάς αποδίδεται κυρίως (Τολίκας κ.ά,2000):

- ❖ Στην αλόγιστη και υπερβολική χρήση λιπασμάτων, πλούσια σε άζωτο και φώσφορο
- ❖ Στις υπερβολικές και μη κανονικές αρδεύσεις των καλλιεργειών
- ❖ Στον μεγάλο όγκο των νερών έκπλυσης και στράγγισης των εδαφών

- ❖ Στην αύξηση της συγκέντρωσης των υδατοδιαλυτών φωσφορικών αλάτων στα νερά έκπλυσης και στράγγισης
- ❖ Στα φωσφορικά άλατα των φυτοφαρμάκων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα οργανικά φυτοφάρμακα εμπλουτίζουν τα νερά με αζωτούχες, υδροθειούχες, φωσφορούχες και άλλες υδατοδιαλυτές χημικές ενώσεις, με υδατοδιαλυτά χουμικά άλατα, με κολλοειδή και μη αιωρούμενα οργανικά άλατα αλειφατικών ετεροκυκλικών χημικών ενώσεων. Τα οργανικά φυτοφάρμακα συμβάλλουν στον ευτροφισμό της λίμνη και συντελούν στην αύξηση της τοξικότητας της τροφική αλυσίδας.

Επίσης η έκπλυση των βοσκοτόπων που περιστοιχίζουν την λίμνη , τα οποία είναι πλούσια σε οργανικό υλικό αποτελούν ακόμη μια πηγή ρύπανσης.

Ρύπανση από χωματερές

Οι σκουπιδότοποι που λειτουργούσαν στο Νομό αποτέλεσαν ένα σημαντικό παράγοντα ρύπανσης κυρίως του υπόγειου υδροφορέα μέσω των στραγγισμάτων που παράγονται από την αποσύνθεση των στερών αποβλήτων.

Η ίδρυση της ΔΙ.Α.ΔΥ.ΜΑ (Διαχείριση Απορριμμάτων Δυτικής Μακεδονίας) η οποία βασίστηκε σε οικονομοτεχνική μελέτη Σκοπιμότητας του 1996 με μέτοχο τον Δήμο Καστοριάς, εφαρμόζει ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα διαχείρισης των απορριμμάτων. Το συνολικό ύψος της επένδυσης εκτιμάται στα 33 εκατ. Ευρώ για την περίοδο 1998-2007. Ο περιφερειακός ΧΥΤΑ Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων, το πρώτο κύτταρο του οποίου μαζί με τις υποστηρικτικές υποδομές ολοκληρώθηκαν το 2003 & 2004 , ενώ το δεύτερο κύτταρο ολοκληρώθηκε το Νοέμβριο του 2006. Εννέα υποδομές μεταφόρτωσης κατασκευάστηκαν έως σήμερα και άλλη μια στην Δεσκάτη Γρεβενών είναι ακόμα υπό κατασκευή. Με αυτό τον τρόπο εξυπηρετούνται οι ανάγκες των 60 ΟΤΑ της Περιφέρειας

συμπεριλαμβανομένου και του Δήμου Καστοριάς, διατίθενται καθημερινά 100 τόννοι απορριμμάτων μόνο από το Νομό Καστοριάς με απόλυτα ασφαλή τρόπο, έχει τεθεί σε πλήρη εφαρμογή το πρόγραμμα περιβαλλοντικής παρακολούθησης για το βιοαέριο και τα στραγγίσματα αλλά επίσης η εφαρμογή της μηχανικής επεξεργασίας και ανάκτησης θα αυξήσει τον χρόνο ζωής του ΧΥΤΑ σε περισσότερα από τριάντα χρόνια.

Από τον Ιούνιο του 2005 σταμάτησαν να λειτουργούν οι σκουπιδότοποι του Νομού Καστοριάς καθώς άρχισε να λειτουργεί ο Σταθμός μεταφόρτωσης της Διαχείριση Απορριμμάτων της Δυτικής Μακεδονίας (ΔΙ.Α.ΔΥ.ΜΑ) .

Υπολογίζεται ότι η ετήσια ποσότητα οικιακών απορριμμάτων που παράγονται στον νομό ανέρχεται σε 18 χιλ. Τόνους (Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Καστοριάς τμήμα Περιβάλλοντος).

Για το Δήμο Καστοριάς υπολογίζεται ότι το ετήσιο κόστος συλλογής / μεταφοράς και διάθεσης των απορριμμάτων ανέρχεται περίπου στο ποσό των 41085,84 € (Στοιχεία ΔΙ.Α.ΔΥ.ΜΑ).

Ρύπανση από παραγωγικές δραστηριότητες

Στην λεκάνη απορροής λειτουργούν δυο βυρσοδεψεία τα οποία αποτελούν κίνδυνο ρύπανσης της λίμνης από τοξικές ουσίες τις οποίες χρησιμοποιούν κατά την επεξεργασία των δερμάτων. Τα υπάρχοντα βυρσοδεψεία διαθέτουν σύστημα επεξεργασίας αποβλήτων. Το ένα βυρσοδεψείο μάλιστα συνδέεται στον κεντρικό βιολογικό καθαρισμό της πόλης για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Στο άλλο τα λύματα εναποτίθενται στον περιβάλλοντα χώρο του.

Οι κτηνοτροφικές μονάδες, οι οποίες βρίσκονται διάσπαρτες στην παραλίμνια περιοχή, αποτελούν πηγές ρύπανσης της λίμνης. Το ίδιο αποτελούν και οι γεωργικές εκτάσεις, οι οποίες με την χρήση των φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων ανάλογα με

την καλλιέργεια φορτίζουν την λίμνη με πλήθος ρυπογόνων ουσιών καθώς η χρήση τους είναι ανεξέλεγκτη

Ρύπανση από άλλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες που αφορούν εκχερσώσεις και μπαζώματα υποβαθμίζουν τους περιφερειακούς παράκτιους οικοτόπους .

Έτσι προκύπτει επιτακτικά η ανάγκη άμεσης δημιουργίας ειδικών προϋποθέσεων ελέγχου, προστασίας και ορθολογικής διαχείρισης της λίμνης, σαφούς οριοθέτησης του υδροβιότοπου της και εφαρμογής ειδικού νομικού και διαχειριστικού καθεστώτος χρήσεων και δραστηριοτήτων στην περιοχή (Οικονομόπουλος κ.α ,1994).

2.6 Μετρήσεις πεδίου και μέθοδοι δειγματοληψίας της λίμνης Καστοριάς

2.6.1. Σημεία και συχνότητα δειγματοληψίας

Η επιλογή των ακριβών θέσεων των σημείων δειγματοληψίας προσδιορίστηκαν με καταγραφή των γεωγραφικών στιγμάτων με φορητό Global Position System GPS.

Ο καθορισμός των σταθμών δειγματοληψίας έγινε με βάση τα εξής γνωρίσματα της λίμνης α) το σχήμα και την έκταση, β) τις εισροές μόνο από τους χείμαρρους γ) τη θέση της πόλης της Καστοριάς. (Εικόνα 24)



Εικόνα 24. Οι θέσεις δειγματοληψίας στη λίμνη της Καστοριάς

Από το έτος 2002 υπάρχουν μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για το γραφείο Λίμνης και Περιβάλλοντος του Δήμου Καστοριάς στο εργαστήριο του βιολογικού καθαρισμού. Όμως οι δειγματοληψίες δε γινόταν συστηματικά. Από το 2005 έως σήμερα οι δειγματοληψίες και οι αναλύσεις γίνονται συστηματικά και έχουν συγκεντρωθεί μια σειρά αποτελεσμάτων τα οποία παρουσιάζονται στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

2.6.2. Διαδικασία δειγματοληψίας

Η διαδικασία είχε σαν σκοπό την εφαρμογή ενός προγράμματος δειγματοληψιών για τον έλεγχο της ποιότητας των επιφανειακών νερών της λίμνης Καστοριάς με την ανάλυση φυσικοχημικών παραμέτρων.

Τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνταξη της διαδικασίας είναι τα ISO 5667, ISO/DIS 19458 και τα αναφερόμενα στο Standard Methods for Analysis of Water and Wastewater (2000).

Κατά την δειγματοληψία τα σημεία είχαν ικανοποιητική ανάμιξη. Επίσης στα σημεία δειγματοληψίας, το νερό δεν παρουσίαζε πολύ έντονους στροβίλους ή αφρισμό. Επιπρόσθετα τα σημεία βρίσκονταν σε αρκετή απόσταση από την όχθη και σε ικανοποιητικό βάθος (τουλάχιστον 4m) ώστε εξασφαλιζόταν η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος. Δε συλλεγόταν μαζί με το δείγμα φερτά σώματα (π.χ. φύλλα, κλπ.) και το βάθος δειγματοληψίας ήταν 30cm. Η φιάλη δειγματοληψίας δεν ήταν τελείως γεμάτη, για να αναδεύεται το δείγμα.

Ο χρόνος δειγματοληψίας επιλεγόταν με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- Να μην είχαν προηγηθεί έντονες βροχοπτώσεις ή πλημμύρες
- Να μην υπήρχε σημαντική θερμοκρασιακή μεταβολή τις τελευταίες δυο μέρες πριν την δειγματοληψία.

Μετά την συλλογή τους τα δείγματα τοποθετούσαν αν δεν αναλύονταν άμεσα στο ψυγείο στους 2-8 °C.

Η διήθηση των δειγμάτων του νερού μέσω ηθμών 0,7 μm για την απομάκρυνση του σωματιδιακού υλικού από το νερό και την κατακράτηση του σε ηθμούς γινόταν χωρίς καθυστέρηση στο εργαστήριο.

2.6.3 Ποσοτικός προσδιορισμός των παραμέτρων.

Η θερμοκρασία και το οξυγόνο μετρήθηκαν με το κατάλληλο φορητό όργανο τύπου Oxy330 VTV. Το pH με πεχάμετρο τύπου Orion και η αγωγιμότητα με αγωγιμόμετρο τύπου Hack.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των νιτρικών ($\text{NO}_3\text{-N}$), των νιτρωδών ($\text{NO}_2\text{-N}$) των αμμωνιακών ιόντων ($\text{NH}_4\text{-N}$) καθώς και των ορθοφωσφορικών ιόντων ($\text{PO}_4\text{-}$

P), πραγματοποιήθηκε με φασματοφωτόμετρο τύπου Hack με αντιδραστήρια της ίδιας εταιρίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές της.

Ο προσδιορισμός των νιτρικών ιόντων ($\text{NO}_3\text{-N}$) έγινε με την μέθοδο αναγωγής καδμίου, των νιτρωδών ιόντων ($\text{NO}_2\text{-N}$) με την μέθοδο σουλφανιλικού οξέος, των αμμωνιακών ιόντων με την μέθοδο Nessler και τέλος ο προσδιορισμός των ορθοφωσφορικών ιόντων ($\text{PO}_4\text{-P}$) έγινε με την μέθοδο του ασκορβικού οξέος. Η μονάδα μέτρησης των προσδιορισμών είναι mg/l.

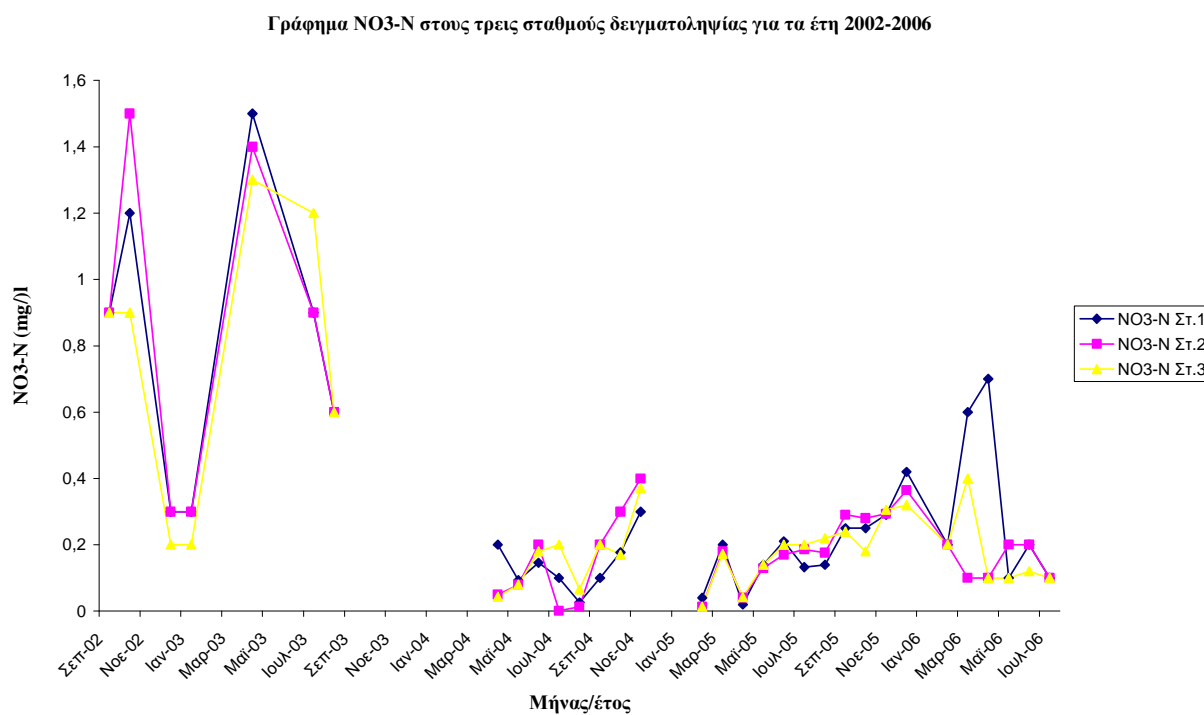
Οι παραπάνω μέθοδοι προσδιορισμού που υποστηρίζονται με την χρήση του φασματοφωτομέτρου, συγκαταλέγονται στις εγκεκριμένες μεθόδους ανάλυσης (APHA). Το BOD_5 μετρήθηκε μανομετρικά σε συσκευή μέτρησης BOD. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων μετρήθηκαν σε mg/l.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

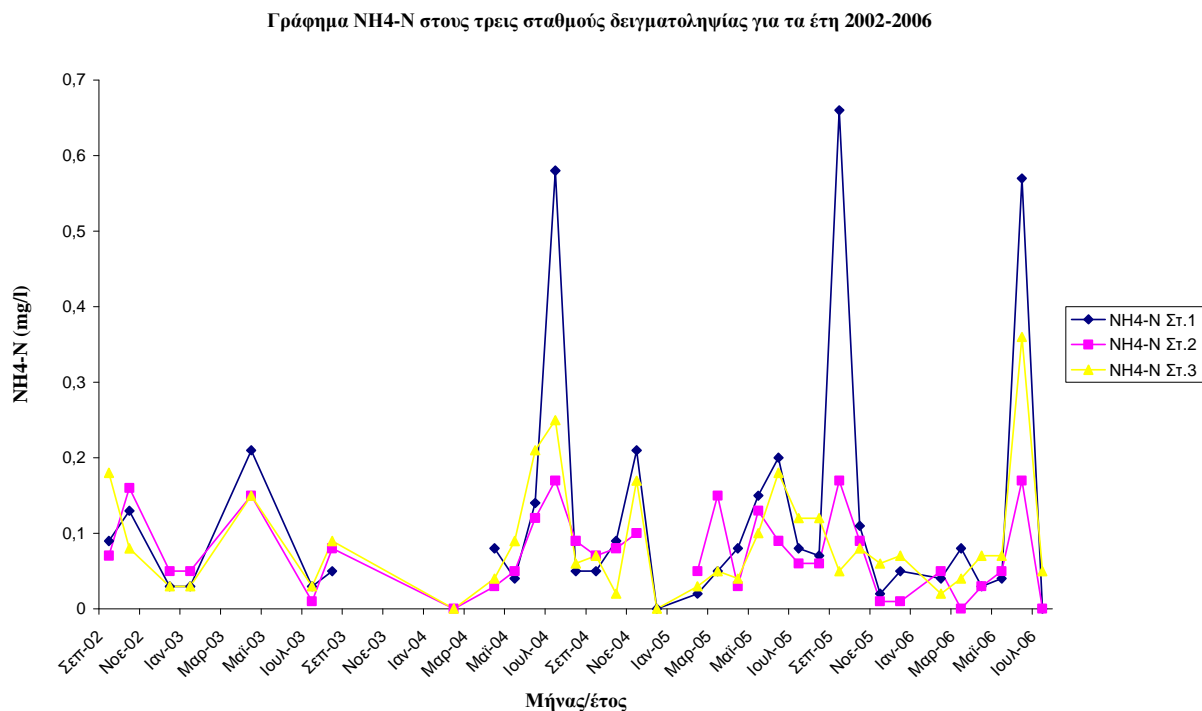
3.1 Γραφήματα των παραμέτρων

Αρχικά τα σημεία δειγματοληψίας αφορούσαν τρεις σταθμούς. Έτσι υπάρχουν από το 2002 δεδομένα για τρεις σταθμούς εντός της λίμνης και μάλιστα οι μετρήσεις των δυο σταθμών είναι οι πληρέστερες.

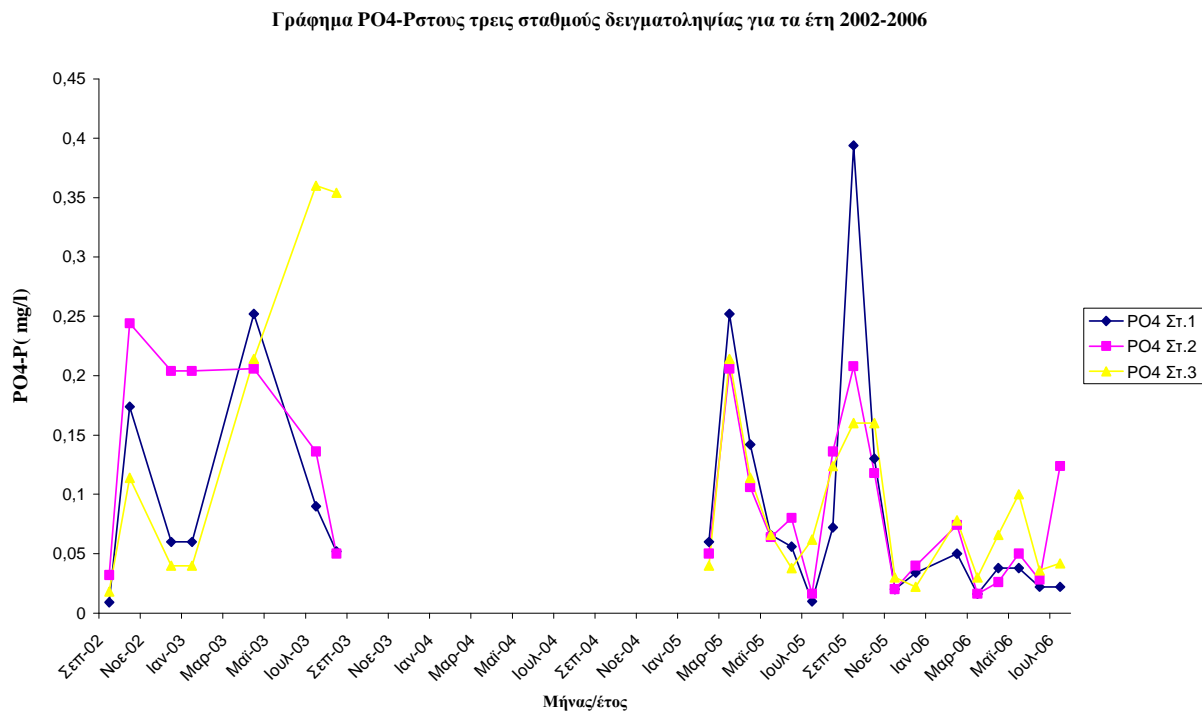
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα γραφήματα των φυσικοχημικών παραμέτρων που μετρήθηκαν στους σταθμούς δειγματοληψίας.



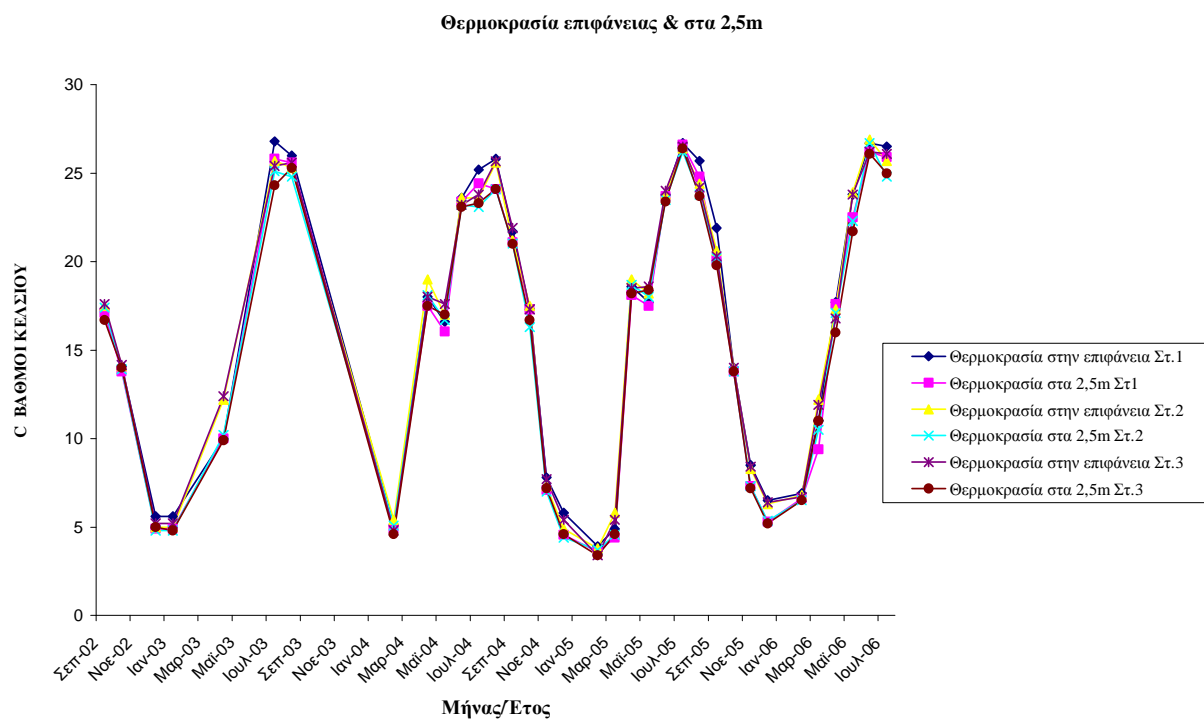
Εικόνα 25 Γράφημα διακύμανσης των νιτρικών ιόντων $NO_3 - N$ κατά την διάρκεια των ετών 2002-2006.



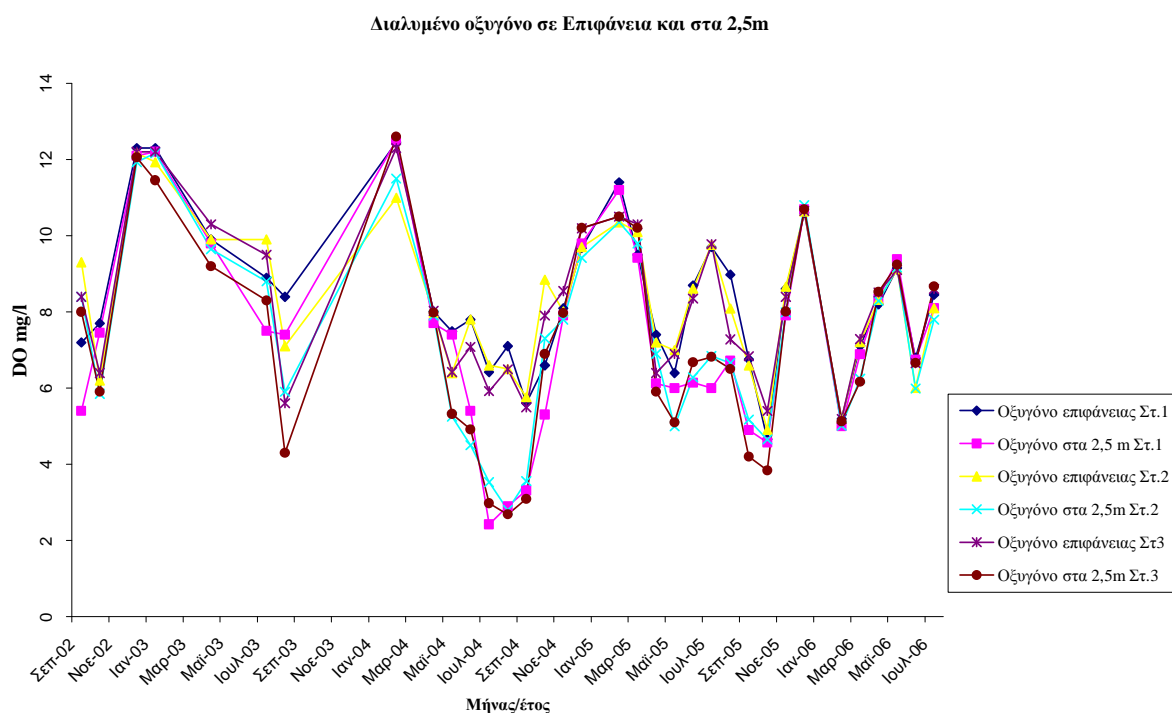
Εικόνα 26 Γράφημα διακύμανσης των αμμωνιακών ιόντων $NH_4 - N$ κατά την διάρκεια των ετών 2002-2006



Εικόνα 27 Γράφημα διακύμανσης των ορθοφωσφορικών ιόντων $PO_4 - P$ κατά την διάρκεια των ετών 2002-2006



Εικόνα 28 Γράφημα διακύμανσης της θερμοκρασίας επιφάνειας και στα 2,5m κατά τα έτη 2002-2006.



Εικόνα 29 Γράφημα διακύμανσης του διαλυμένου οξυγόνου στην επιφάνεια και σε 2,5m βάθους κατά τα έτη 2002-2006

Μελετώντας τις αυξομειώσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων και στους τρεις σταθμούς παρατηρούμε ότι όσον αφορά τα νιτρικά ιόντα ($\text{NO}_3\text{-N}$), οι τιμές τους κυμάνθηκαν από 1,5 η μέγιστη έως 0,001 mg/l η ελάχιστη, τα αμμωνιακά ιόντα ($\text{NH}_4\text{-N}$) από 0,66 έως 0 mg/l και τα ορθοφωσφορικά ($\text{PO}_4\text{-P}$) κυμάνθηκαν από 0,399 έως 0,009 mg/l. Οι υψηλότερες τιμές των νιτρικών ιόντων ($\text{NO}_3\text{-N}$) και των ορθοφωσφορικών ($\text{PO}_4\text{-P}$) παρατηρήθηκαν κατά τα έτη 2002 και 2003. Επίσης συγκριτικά ο σταθμός που εμφανίζει τις πιο υψηλές τιμές είναι ο Σταθμός 1 η Σιούτιστα όπου βρίσκεται κοντά σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις και σε εκβολές ρεμάτων.

Γενικά ακολουθείται ετήσια η ίδια συμπεριφορά στις μεταβολές των συγκεντρώσεων. Οι συγκεντρώσεις των ορθοφωσφορικών στο επιφανειακό νερό εμφανίζουν υψηλές τιμές στις θερμές ξηρές περιόδους. Οι μέγιστες τιμές εντοπίζονται τον Σεπτέμβριο – Οκτώβριο και είναι επόμενο αν ληφθεί υπόψη η άνθιση των φυκών – ευτροφισμός και η απελευθέρωση του φωσφόρου από το ίζημα συνοδευόμενη από χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου. Επίσης οι συγκεντρώσεις αυξάνουν σε περιόδους που έχουμε σημαντική εισροή εξωτερικών φορτίων μέσω των εκπλύσεων των εδαφών.

Τα νιτρικά ιόντα $\text{NO}_3\text{-N}$ παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις την άνοιξη και τον χειμώνα, οι οποίες αποδίδονται στις εισροές από τις εκπλύσεις εδαφών. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού οι συγκεντρώσεις παρουσιάζουν πτωτική τάση πιθανό από την βιολογική δράση και δέσμευση από τα αναπτυσσόμενα φύκη. Υψηλές συγκεντρώσεις εμφανίζονται στους σταθμούς οι οποίοι βρίσκονται κοντά σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις και ρέματα .

Οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών ιόντων ($\text{NH}_4\text{-N}$) αυξάνουν εξαιτίας των εισροών και αποκτούν υψηλές συγκεντρώσεις. Οι υψηλότερες εμφανίζονται σε

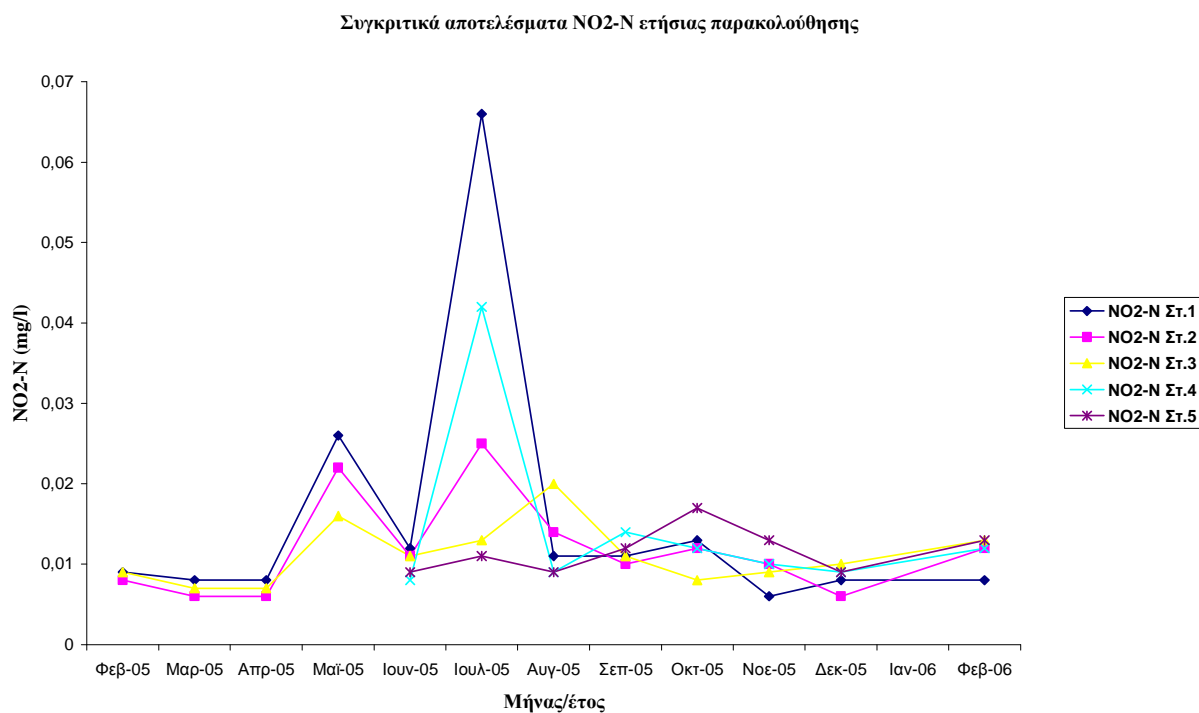
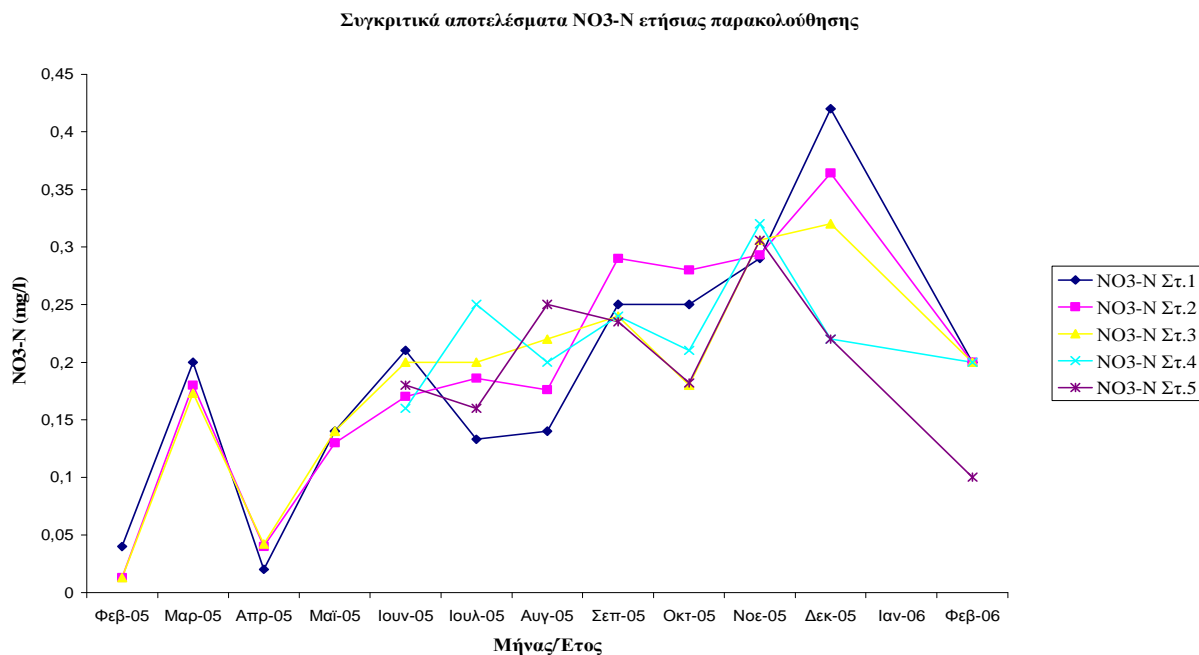
περιόδους έντονης αποικοδόμησης της νεκρής οργανικής ύλης τον Σεπτέμβριο κυρίως.

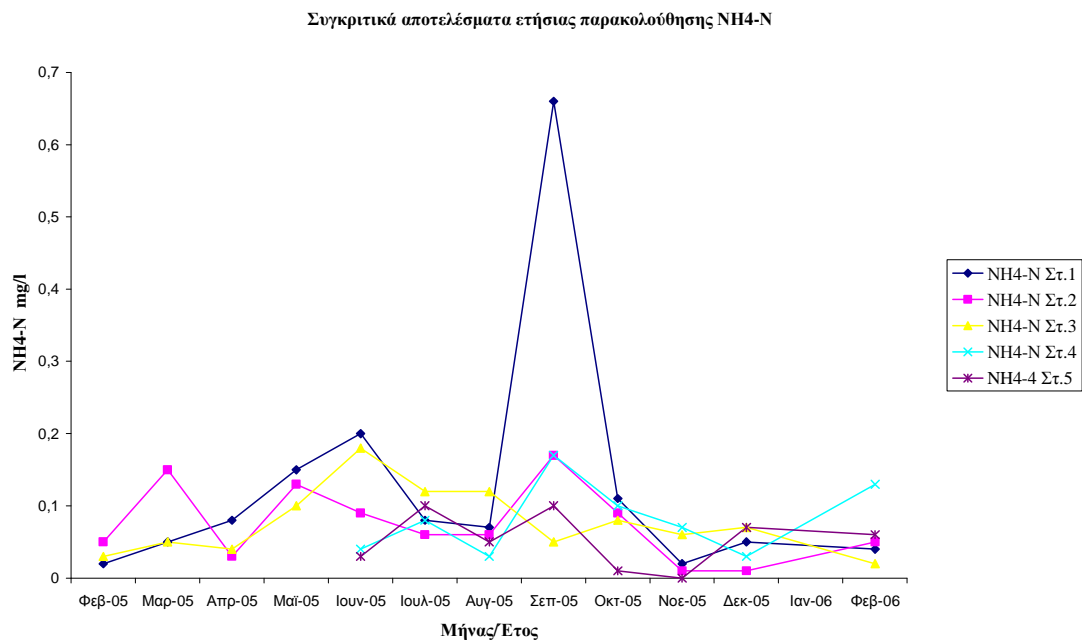
Το BOD το οποίο μετρήθηκε στον Σταθμό 3 εμφανίζει αυξητικές τάσεις την καλοκαιρινή περίοδο με μέγιστη τιμή 8 τον Σεπτέμβριο του 2005.

Η αγωγιμότητα στον ίδιο σταθμό κυμάνθηκε από 338 $\mu\text{S}/\text{cm}$ η ελάχιστη η οποία σημειώθηκε τον Ιούλιο του 2003 έως 413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ η μέγιστη η οποία σημειώθηκε τον Μάιο του 2002 και η οποία δικαιολογείται από την αύξηση της συγκέντρωσης των θρεπτικών ιόντων.

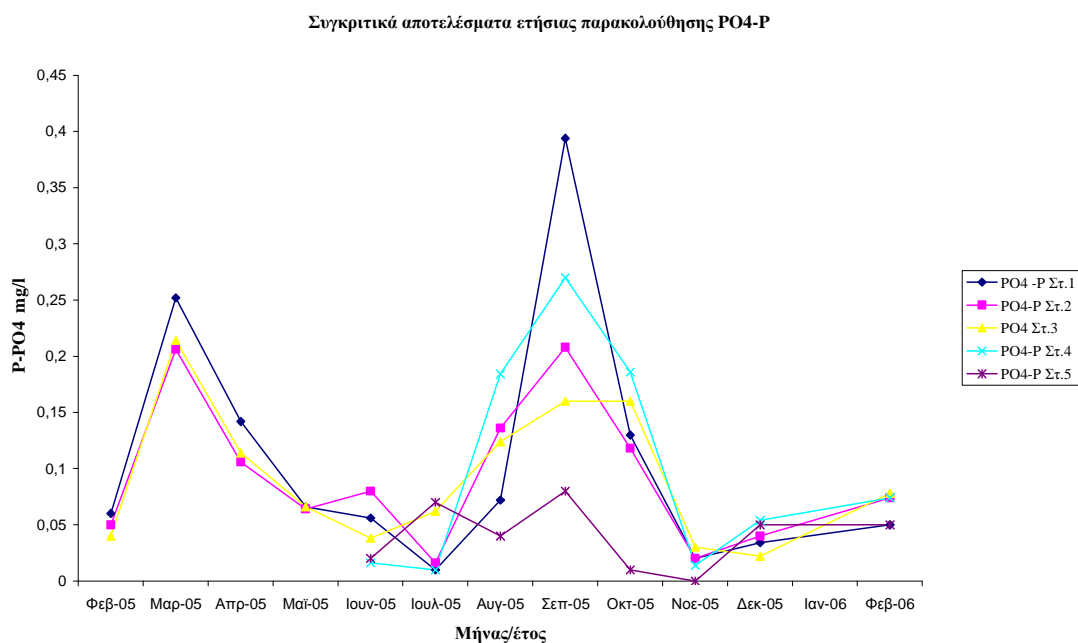
Για το διάστημα από Φεβρουάριο του 2005 έως Φεβρουάριο του 2006 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μόνο στους 3 σταθμούς και από τον Ιούνιο του 2005 προστέθηκαν και άλλοι δυο κοντά στην ανάπτυξη της πόλης, ο ένας στην Θέση Σταυρός της Νότιας Παραλίας και ο άλλος στην Θέση Αη Σωτήρα στην Β. Παραλία .

Στην συνέχεια εμφανίζονται γραφικά τα συγκριτικά αποτελέσματα ετήσιας παρακολούθησης από τον Φεβρουάριο του 2005 έως τον Φεβρουάριο του 2006.

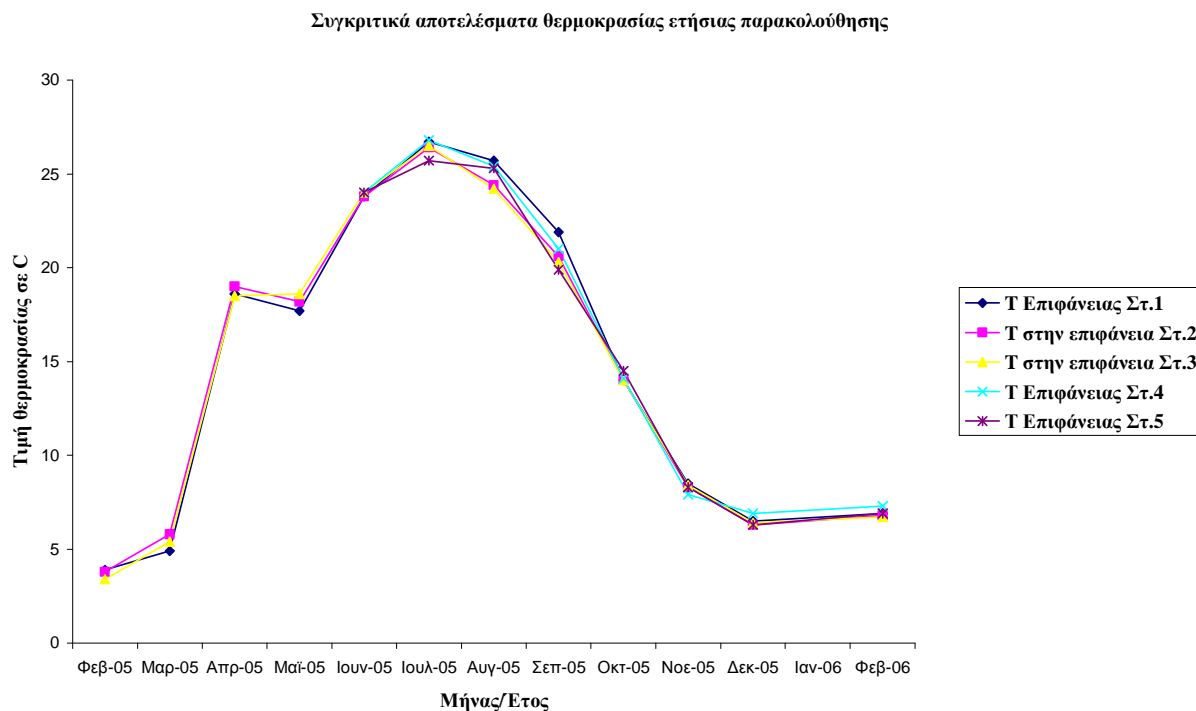




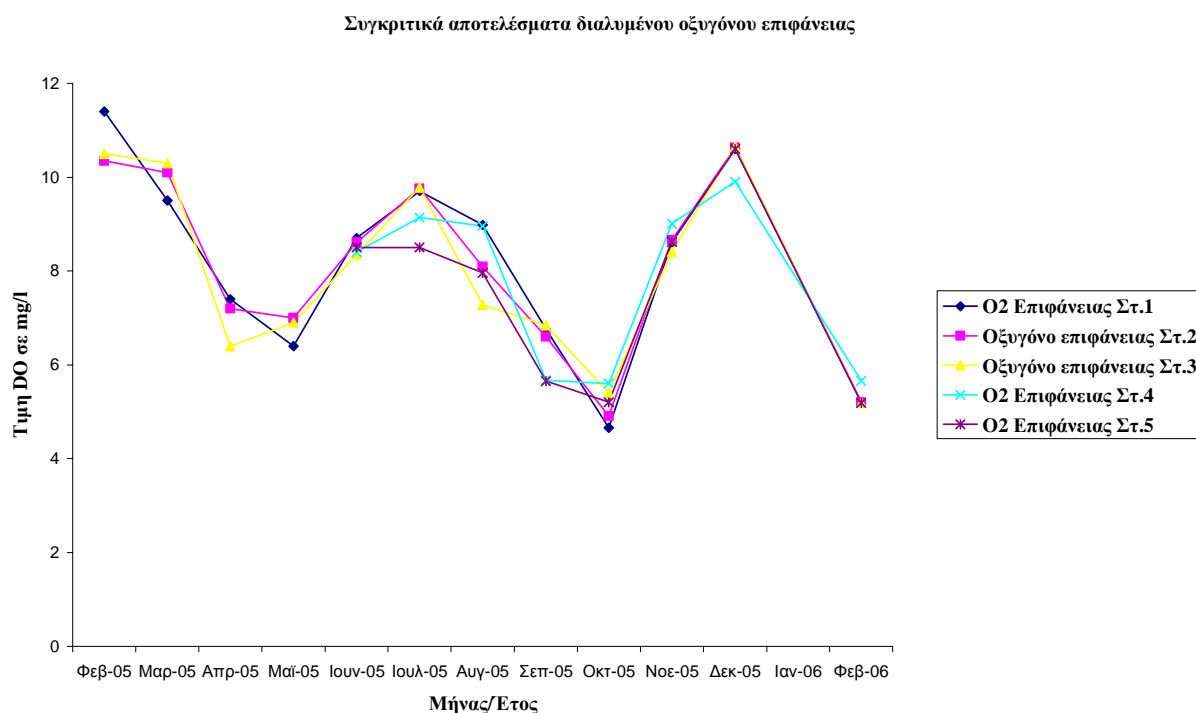
Εικόνα 32 Ετήσια διακύμανση των αμμωνιακών ιόντων ($NH_4 - N$)
από τον Φεβρουάριο 05-Φεβρουάριο 06



Εικόνα 33 Ετήσια διακύμανση των ορθοφωσφορικών ιόντων ($PO_4 - P$)
από τον Φεβρουάριο 05-Φεβρουάριο 06

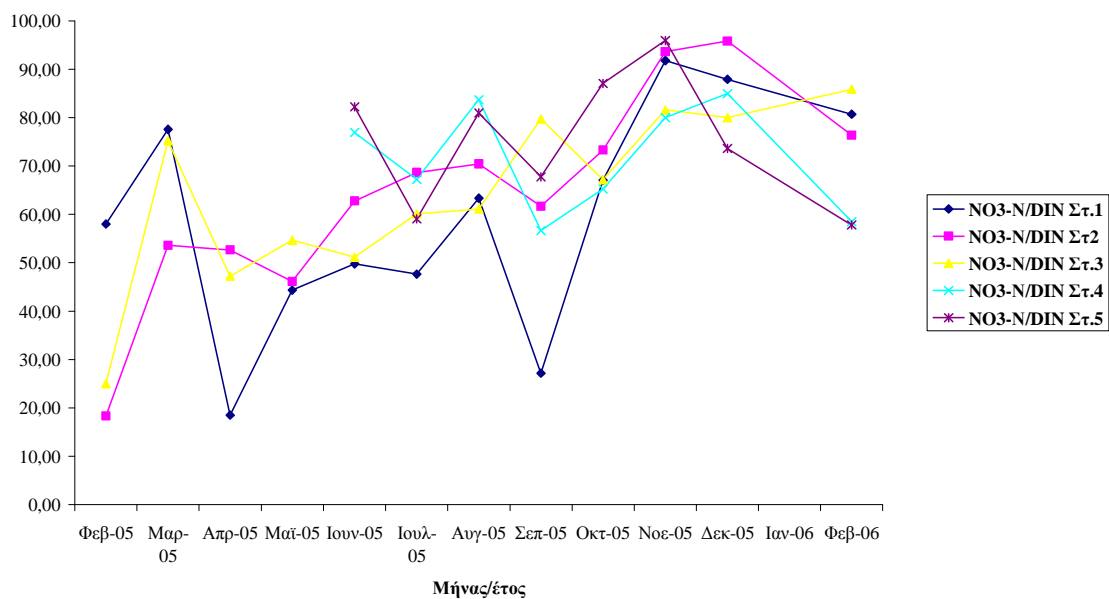


Εικόνα 34 Ετήσια διακύμανση της θερμοκρασίας στους πέντε σταθμούς δειγματοληψίας από Φεβρουάριο 05- Φεβρουάριο 06



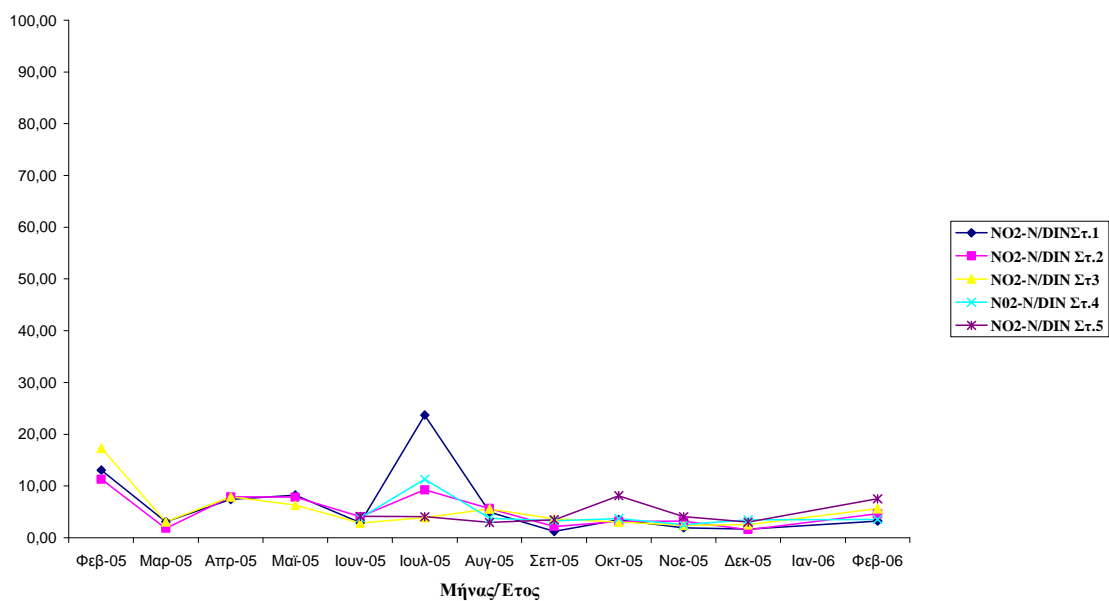
Εικόνα 35 Ετήσια διακύμανση της διαλυμένου O_2 στους πέντε σταθμούς δειγματοληψίας από Φεβρουάριο 05 – Φεβρουάριο 06

Γράφημα ποσοστιαίας συμμετοχής των νιτρικών ιόντων στο συνολικό ανόργανο άζωτο

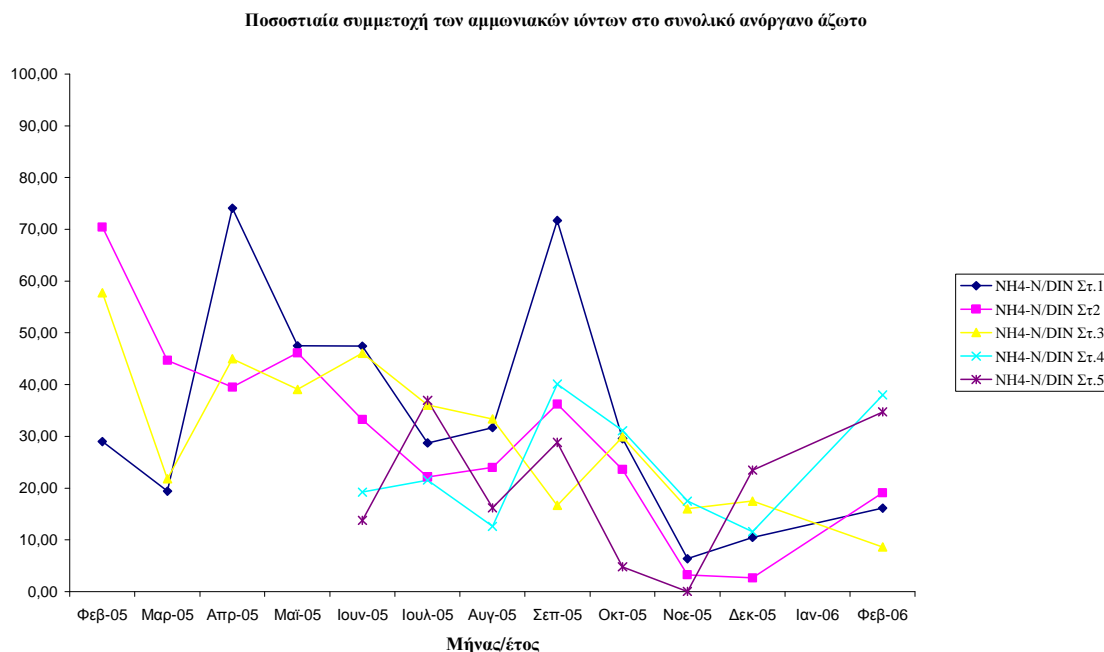


Εικόνα 36 Ποσοστιαία συμμετοχή των νιτρικών ιόντων
στο συνολικό ανόργανο άζωτο

Ποσοστιαία συμμετοχή των νιτρωδών ιόντων στο συνολικό ανόργανο άζωτο



Εικόνα 37 Ποσοστιαία συμμετοχή των νιτρωδών ιόντων
στο συνολικό ανόργανο άζωτο



Εικόνα 38 Ποσοστιαία συμμετοχή των αμμωνιακών ιόντων στο συνολικό ανόργανο άζωτο.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων από τον Φεβρουάριο του 2005 έως τον Φεβρουάριο του 2006 δηλ. σε διάστημα ενός έτους διαπιστώνουμε ότι η θερμοκρασία κυμάνθηκε από 3,4 η ελάχιστη η οποία σημειώθηκε κατά τον μήνα Φεβρουάριο του 2005 στον σταθμό 3 ενώ η μέγιστη σημειώθηκε τον Ιούλιο στον Σταθμό 4 .

Το διαλυμένο οξυγόνο κυμάνθηκε από 11,4 mg/l η οποία ήταν και η μέγιστη τιμή και παρατηρήθηκε τον Φεβρουάριο του 2005 και η ελάχιστη 4,66 mg/l η οποία σημειώθηκε τον Οκτώβριο. Το Φεβρουάριο του 2006 η περιεκτικότητα του διαλυμένου οξυγόνου ήταν χαμηλή καθώς η λίμνη παρέμεινε παγωμένη για μεγάλο χρονικό διάστημα και η θερμοκρασία της παρακείμενης ατμόσφαιρας ήταν πολύ χαμηλή.

Τα ορθοφωσφορικά άλατα κυμάνθηκαν από 0,014 mg/l η ελάχιστη τιμή η οποία σημειώθηκε τον Ιούλιο του 2005 έως 0,394 mg/l η μέγιστη τιμή που σημειώθηκε τον Σεπτέμβριο του 2005, η οποία δικαιολογείται από την δυναμική των αλγών και την απελευθέρωση εσωτερικού φορτίου φωσφόρου υπό συνθήκες χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου. Υψηλές τιμές σημειώθηκαν και κατά τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο όπου οι βροχοπτώσεις ήταν έντονες και η εισροή φορτίων φωσφόρου σημαντική.

Τα νιτρικά ιόντα $\text{NO}_3\text{-N}$ παρουσίασαν μέγιστα και ελάχιστα ποσοστά κατά την διάρκεια της ετήσιας αυτής παρακολούθησης. Οι υψηλές συγκεντρώσεις σημειώθηκαν κατά την διάρκεια της άνοιξης και του χειμώνα πιθανά από τις εισροές λόγω των βροχοπτώσεων φορτίων νιτρικών με τις αποπλύσεις των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού υπήρξε μείωση η οποία δικαιολογείται από την βιολογική χρήση- δέσμευση από τα νιτροποιητικά βακτήρια και τα φύκη. Μέγιστη τιμή 0,42 mg/l, παρατηρήθηκε το Δεκέμβριο του 2005 στον Σταθμό 1 και ελάχιστη 0,013 mg/l, παρατηρήθηκε το Φεβρουάριο του 2005, στον Σταθμό2.

Η συγκέντρωση των νιτρώδων ιόντων $\text{NO}_2\text{-N}$ διατηρούνταν σε χαμηλά επίπεδα. Τα χαμηλότερα σημειώθηκαν έως τον Απρίλιο του 2005, ενώ από τον Μάιο του 2005 έως τον Αύγουστο παρατηρείται αυξητική τάση. Από τον Σεπτέμβριο του 2005 έως τον Φεβρουάριο επανέρχονται σε χαμηλές τιμές. Η μέγιστη τιμή που σημειώθηκε αφορά τον Σταθμό 2 στην θέση Ξηροπόταμος και είναι 0,2 mg/l τον Μάιο του 2005.

Η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων $\text{NH}_4\text{-N}$ παρουσίασε αύξηση κατά την άνοιξη η οποία προέρχεται από τα φορτία που εισρέουν στην λίμνη με την έκλυση των εδαφών. Το καλοκαίρι ελαττώνεται καθώς αναπτύσσεται το φυτοπλαγκτόν που δεσμεύει άζωτο. Ενώ από τον μήνα Σεπτέμβριο όπου ξεκινούν οι διαδικασίες

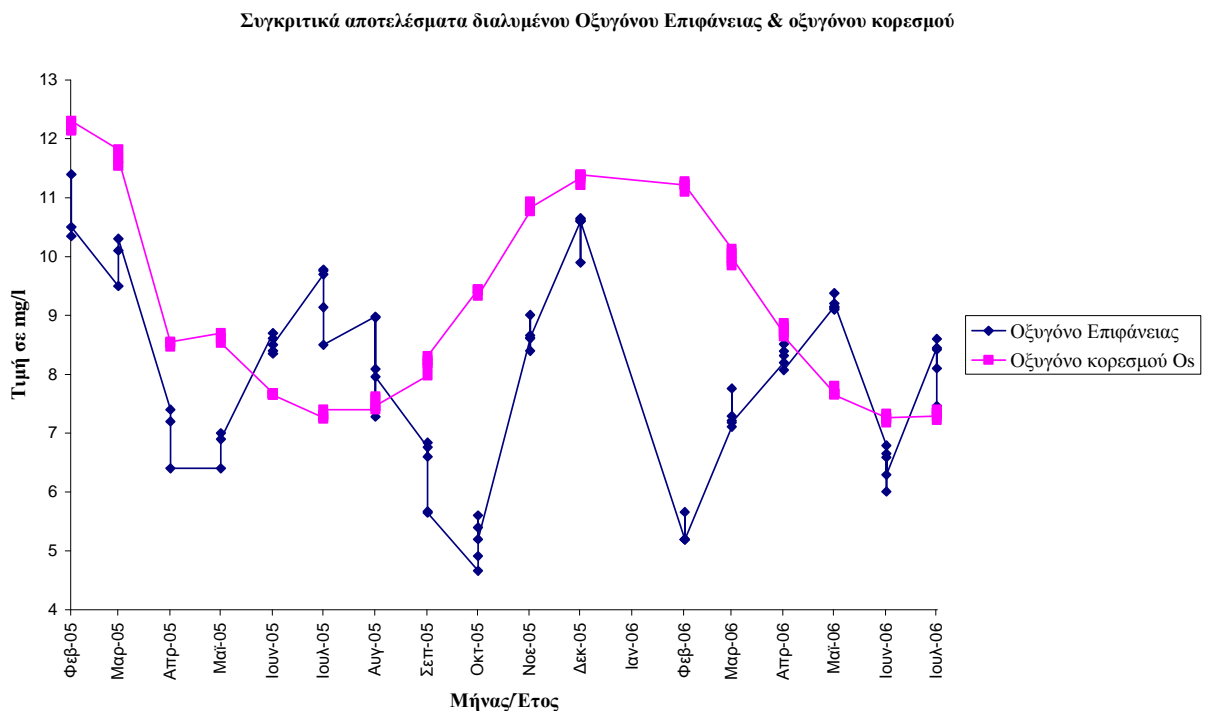
αποσύνθεσης της οργανικής ύλης και οι συγκεντρώσεις οξυγόνου είναι χαμηλές, τα αμμωνιακά ιόντα αυξάνουν. Τον Ιούνιο παρουσιάστηκε αυξημένη συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων στον Σταθμό 1, η οποία μπορεί να οφείλεται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα. Η μέγιστη τιμή 0,66 mg/l σημειώθηκε στον σταθμό 1 και η ελάχιστη (μηδενική), το Νοέμβριο στο Σταθμό 5.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα της ποσοστιαίας συμμετοχής των νιτρικών, νιτρώδων και αμμωνιακών ιόντων στο συνολικό ανόργανο άζωτο διαπιστώνουμε ότι:

- Τα νιτρικά ιόντα παρουσίασαν μέγιστα ποσοστά 95,78% και 95,92% κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Νοέμβριο του 2005 στους σταθμούς 2 και 5 αντίστοιχα που οφείλονται πιθανά στις αποπλύσεις των γεωργικών καλλιεργειών. Τα νιτρικά ιόντα εμφάνισαν το χαμηλότερο ποσοστό τον Φεβρουάριο του 2005, ίσο με 18,3%.
- Τα νιτρώδη ιόντα βρίσκονται καθόλη την διάρκεια της ετήσιας παρακολούθησης σε χαμηλά επίπεδα. Το μέγιστο ποσοστό 23,65% σημειώθηκε στο σταθμό 1 τον μήνα Ιούλιο του 2005. Τα νιτρώδη, δεν μπορούν να αξιολογηθούν εμπειριστικά, γιατί είναι μια πολύ ασταθής κατάσταση μεταξύ των νιτρικών και των αμμωνιακών.
- Τα αμμωνιακά ιόντα παρουσίασαν μέγιστα ποσοστά 74,07% στο σταθμό 1 τον Απρίλιο του 2005 και 71,66% τον Σεπτέμβριο του 2005 ενώ το ελάχιστο ποσοστό (ποσό) σημειώθηκε τον Νοέμβριο του 2005 στο σταθμό 5. Η κύρια πηγή αμμωνιακών ιόντων προέρχεται από την βακτηριακή αποικοδόμηση του οργανικού υλικού και την άμεση ζωική έκκριση. Όταν επικρατούν ποσοστιαία τα αμμωνιακά ιόντα έναντι των νιτρικών ενδεχομένως να έχουμε συνθήκες πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου, που όταν αυτές πλησιάσουν σε μηδενικό επίπεδο (αναγωγικές συνθήκες), έχουμε και την

έκλυση αερίων CH_4 , H_2S , κάτι που βέβαια δεν έχει παρατηρηθεί στη λίμνη της Καστοριάς γιατί σχεδόν ποτέ δεν πλησίασε το οξυγόνο μηδενικές τιμές.

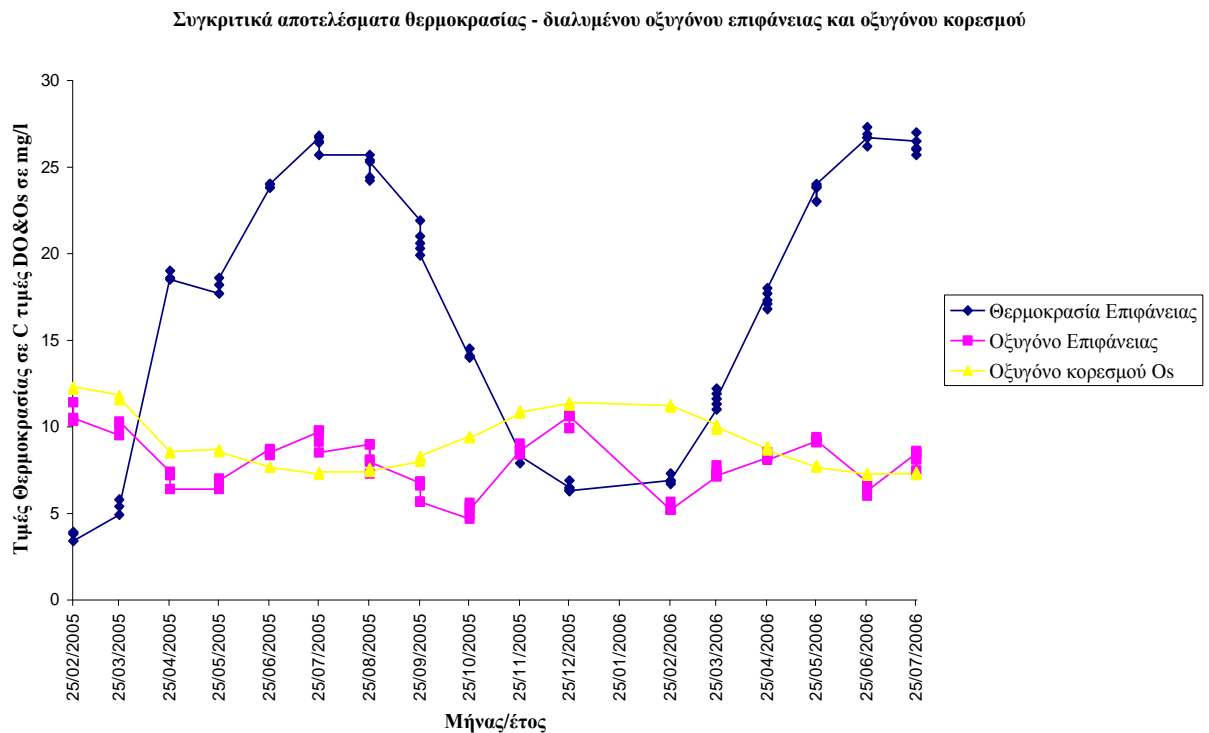
Το ακόλουθο γράφημα προκύπτει από την σύγκριση των μηνιαίων μετρήσεων του οξυγόνου που καταγράφηκαν στους σταθμούς την επικρατούσα θερμοκρασία και του οξυγόνου κορεσμού που υπολογίστηκε σύμφωνα με τον τύπο των Bishop-Grenney ο οποίος συνυπολογίζει την επίδραση της θερμοκρασίας και του υψομέτρου στη συγκέντρωση του οξυγόνου κορεσμού.



Εικόνα 39 Ετήσια διακύμανση της διαλυμένου O_2 και οξυγόνου Κορεσμού O_s .

Λαμβάνοντας υπόψη και την θερμοκρασία, προκύπτει το ακόλουθο γράφημα, στο οποίο περιγράφονται η θερμοκρασία εκφρασμένη σε βαθμούς κελσίου, το διαλυμένο οξυγόνο και το αντίστοιχο οξυγόνο κορεσμού εκφρασμένα σε mg/l, κατά

την χρονική διάρκεια από τον Φεβρουάριο του 2005 έως και τον Ιούλιο του 2006 στους σταθμούς όπου υπήρχαν μετρήσεις.



Εικόνα 40 Ετήσια διακύμανση της διαλυμένου O_2 και οξυγόνου Κορεσμού O_s και θερμοκρασίας επιφάνειας.

Όπως μπορούμε να δούμε και στο γράφημα οι τιμές οξυγόνου τον χειμώνα βρίσκονται κοντά στις τιμές κορεσμού. Εξάιρεση αποτελεί ο Φεβρουάριος του 2006 όπου η λίμνη παρέμεινε παγωμένη και δεν υπήρξε δυνατότητα ανταλλαγής του O_2 του νερού με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, έτσι το οξυγόνο, κάτω από το στρώμα πάγου, έλαβε μικρή τιμή. Κατά το τέλος της άνοιξης και κατά την διάρκεια του καλοκαιριού το διαλυμένο οξυγόνο στο επιφανειακό στρώμα παρουσιάζεται υπερκορεσμένο. Αυτό δικαιολογείται από την περίσσεια οξυγόνου λόγω της έντονης

φωτοσύνθεσης, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μετρήσεις λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της ημέρας όπου συμβαίνουν τα φαινόμενα αυτά.

Οι μετρήσεις περιορίστηκαν σε φυσικοχημικές παραμέτρους. Για να υπάρξει όμως πιο ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης της λίμνης είναι αναγκαίο να πραγματοποιείται και η ανάλυση της χλωροφύλλης-α η οποία αποτελεί βιολογικό δείκτη ευτροφισμού.

3.2 Δισδιάστατα διαγράμματα χωρικής παρεμβολής με GIS.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης της λίμνης της Καστοριάς, ο οποίος προέκυψε από την ψηφιοποίηση των τεσσάρων (4) φύλλων τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:50.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού μέσω του προγράμματος επεξεργασίας εικόνας Photoshop (Φιλίππου, 2005). Ο χάρτης εισήχθη στο πρόγραμμα GIS για να πραγματοποιηθεί η απαραίτητη γεωαναφορά και με τον ίδιο τρόπο ψηφιοποιήθηκε και η ακτογραμμή της λίμνης και εισήχθησαν τα σημεία δειγματοληψίας με βάση τις συντεταγμένες τους.

Στην συνέχεια δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων με το πρόγραμμα access των Windows XP στην οποία περιλήφθηκαν όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το 2002 έως σήμερα.

Με το πρόγραμμα Arcmap και την επέκταση Spatial Analyst προέκυψαν οι ακόλουθοι ισοποσοτικοί – ισορρυπαντικοί δισδιάστατοι χάρτες της λίμνης Ορεστιάδας.

Οι χάρτες εμφανίζουν την γεωγραφική κατανομή της T°C (Temperature-θερμοκρασία) του DO (Dissolved Oxygen- διαλυμένου οξυγόνου), του NH₄-N (αμμωνιακού αζώτου) του NO₃-N (νιτρικού αζώτου) και των ορθοφωσφορικών αλάτων PO₄-P στο επιφανειακό στρώμα της λίμνης.

Η επιλογή πολλών σημείων δειγματοληψίας σε μια περιοχή μελέτης για να μετρηθεί η συγκέντρωση των παραπάνω φυσικοχημικών παραμέτρων είναι συνήθως δύσκολη και ακριβή. Άντ' αυτού, η επιλογή στρατηγικά διασκορπισμένων θέσεων σημείων εισαγωγής δειγμάτων και η χρήση μεθόδων χωρικής παρεμβολής για να οριστούν εκτιμημένες αξίες σε όλες τις άλλες θέσεις, καθιστά εύκολη την παραπάνω διαδικασία.

Οι μέθοδοι παρεμβολής κάνουν κάποιες υποθέσεις για το πως να καθορίσουν τις καλύτερα εκτιμημένες τιμές. Με βάση τα φαινόμενα, οι τιμές αντιπροσωπεύουν και τον καλύτερο τρόπο με τον οποίο τα σημεία δειγμάτων κατανέμονται και διαφορετικοί αλγόριθμοι χωρικής προσομοίωσης θα παράγουν τις καλύτερες εκτιμήσεις σχετικά με τις πραγματικές τιμές. Ανεξάρτητα από την παρεμβολή που κάθε φορά επιλέγεται, όσο περισσότερα είναι τα σημεία εισαγωγής και όσο μεγαλύτερη είναι η κατανομή τους, τόσο πιο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα.

Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν είναι η μέθοδος IDW (Inverse Distance Weighted) και η μέθοδος Spline (σπληνών). Η μέθοδος Kriging, αν και επιλέχθηκε για να χρησιμοποιηθεί, δεν λειτούργησε καθώς οι δειγματοληπτικοί σταθμοί, τα δεδομένα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν, είναι πέντε ενώ το ελάχιστο των δεδομένων των δειγματοληπτικών σταθμών για να εκτελεστεί η μέθοδος Kriging είναι τουλάχιστο δέκα (10).

Η μέθοδος IDW υποθέτει ότι κάθε σημείο εισαγωγής έχει μια τοπική επιρροή που μικραίνει με την απόσταση. Αυτό υπολογίζει καλύτερα τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στο κύτταρο επεξεργασίας από εκείνα τα οποία βρίσκονται πιο μακριά. Ένας συγκεκριμένος αριθμός σημείων ή προαιρετικά όλα τα σημεία σε μια διευκρινισμένη ακτίνα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθοριστεί η τιμή για κάθε θέση. Η παράμετρος δύναμης στην παρεμβολή IDW ελέγχει την σημασία των

περιβαλλόντων σημείων επάνω στην τιμή που έχει υπολογιστεί από τον αλγόριθμο παρεμβολής. Μια μεγαλύτερη δύναμη από τη μονάδα οδηγεί στην λιγότερη επιρροή από τα απόμακρα σημεία.

Η μέθοδος σπληνών παρεμβολής-splines εγκαθιστά μια επιφάνεια ελάχιστης κυρτότητας μέσω των σημείων εισαγωγής. Η κανονικοποιημένη μέθοδος παράγει μια ομαλή επιφάνεια. Η μέθοδος έντασης συντονίζει την ακαμψία της επιφάνειας σύμφωνα με τον χαρακτήρα του διαμορφωμένου φαινομένου. Όταν επιλεγεί η μέθοδος κανονικοποίησης, η παράμετρος βάρους καθορίζει το βάρος των τρίτων παραγώγων της επιφάνειας στην έκφραση της ελάχιστης κυρτότητας. Εάν επιλεγεί η ένταση, η παράμετρος βάρους καθορίζει το βάρος της έντασης. Ο αριθμός παραμέτρου σημείων προσδιορίζει τον αριθμό σημείων ανά περιοχή που χρησιμοποιεί για τοπική προσέγγιση.

Στην περίπτωση της λίμνης της Καστοριάς όπως προαναφέρθηκε και για τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής των παραμέτρων ποιότητας των υδάτων, επιλέχθηκαν δύο προσδιοριστικοί αλγόριθμοι παρεμβολής, οι οποίοι αναλυτικά έχουν ως εξής :

α) Ο αλγόριθμος «Splines» (σπλήνες παρεμβολής): Είναι ένας αλγόριθμος με τον οποίο παρεμβάλλεται μια επιφάνεια ελάχιστης κυρτότητας μέσω των σημείων παρεμβολής. Αυτό γίνεται με την προσαρμογή τοπικών πολωνυμικών εκφράσεων παρεμβολής μικρού βαθμού σε ένα συγκεκριμένο αριθμό κοντινών σημείων παρεμβολής οι οποίες διέρχονται από τα σημεία δειγματοληψίας. Η μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα για τις επιφάνειες με ήπια κλίση του μεγέθους στο οποίο αναφέρονται, όπως το ύψος στάθμης του νερού, ή οι συγκεντρώσεις ρύπανσης. Δεν είναι κατάλληλη εάν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις της κλίσης των μεγεθών επειδή

δεν μπορεί να υπερανυψώσει τις υπολογισμένες τιμές (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 1999).

β) Ο αλγόριθμος «IDW – Inverse Distance Weighting» (σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων): Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, για την υπό μελέτη περιοχή κατασκευάζεται ένας κανάβος, όπου για κάθε σημείο του γίνεται μια τοπική εκτίμηση βασισμένη στα γειτονικά σημεία δειγματοληψίας. Η συλλογή των παρεμβλημένων τιμών του κανάβου δημιουργεί μια εκτίμηση της χωρικής κατανομής των τιμών. Ο απλούστερος τρόπος για την επιλογή των σημείων δειγματοληψίας που θα χρησιμοποιηθούν στην παρεμβολή, είναι να συμπεριληφθούν όλα τα σημεία στην παρεμβολή των σημείων τομής του κανάβου. Η μέθοδος είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των επιλεγμένων σημείων δειγματοληψίας και η παρεμβολή γίνεται με βάση τη σχέση (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 1999):

$$h = \frac{d_1^{-k}}{\sum_{n=1}^N d_n^{-k}} \cdot h_1 + \frac{d_2^{-k}}{\sum_{n=1}^N d_n^{-k}} \cdot h_2 + \dots + \frac{d_N^{-k}}{\sum_{n=1}^N d_n^{-k}} \cdot h_N$$

όπου :

h	η τιμή της μεταβλητής στη ζητούμενη
θέση	
N	ο αριθμός των σημείων που συμμετέχουν
$h_1, h_2, h_3, \dots, h_N$	οι σημειακές μετρήσεις στα σημεία 1,2,3,...,N
$d_1, d_2, d_3, \dots, d_N$	οι αποστάσεις του κυττάρου από τα σημεία 1,2,3,...,N
k	ο συντελεστής επιρροής της απόστασης

Η τιμή του εκθέτη λαμβάνεται συνήθως 1 ή 2 (Dingman, 1994), ενώ για την περίπτωση της λίμνης της Καστοριάς, χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής 2.

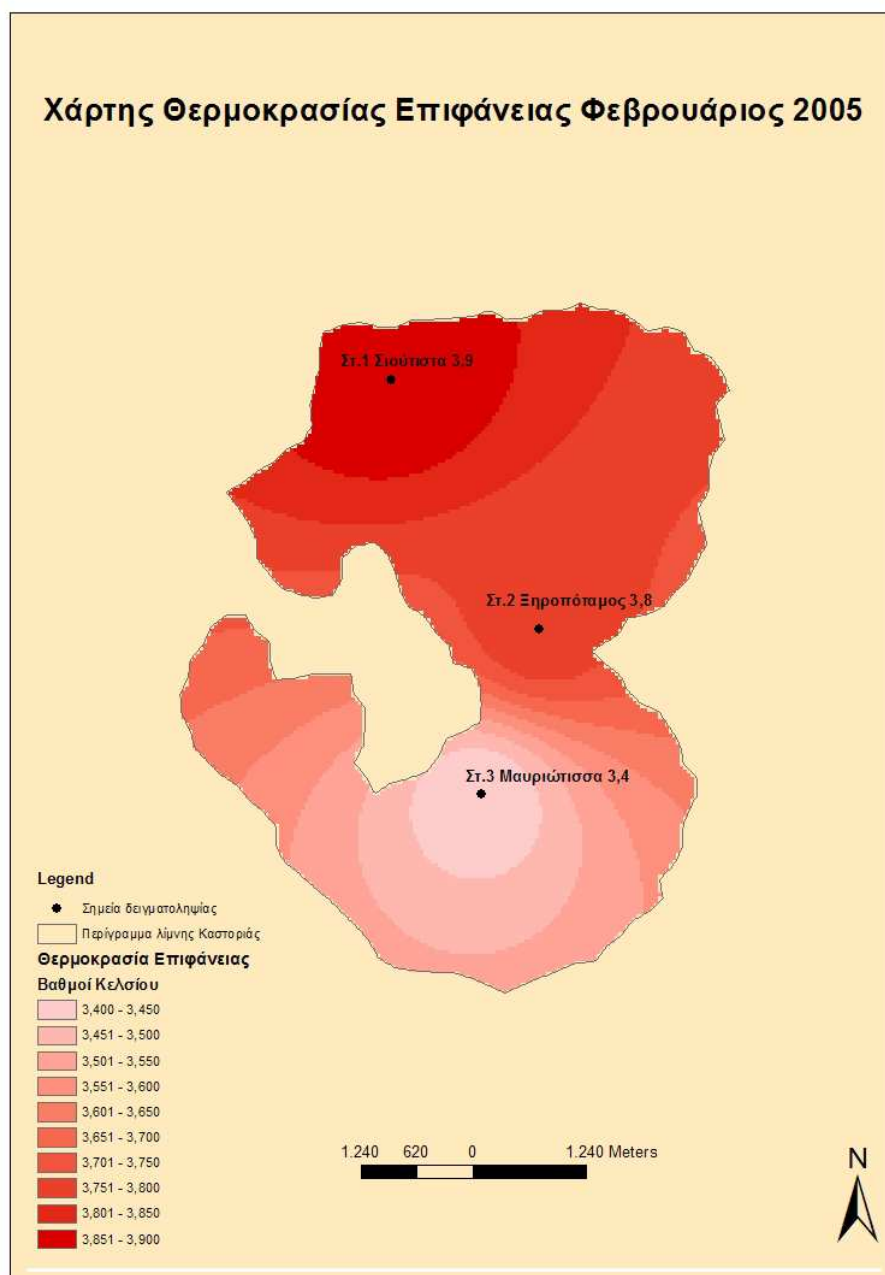
Το δίκτυο των θέσεων δειγματοληψίας, αποτελούνταν από 5 σημεία κατά τα έτη 2002 – 2003, ενώ στη συνέχεια περιορίστηκαν σε 3, αφού δεν λαμβανόταν δείγματα στις θέσεις 4 και 5 στη βόρεια και νότια παραλία αντίστοιχα. Από τα μέσα του 2005, επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις στις θέσεις 4 και 5 με κάποια διαφοροποίηση του σταθμού της Β.Παραλίας. Οι συντεταγμένες των θέσεων αυτών, έχουν βρεθεί με τη βοήθεια Παγκοσμίου Συστήματος Προσδιορισμού Θέσης (**Global Position System – GPS**) και έχουν μετατραπεί με τους κατάλληλους μετασχηματισμούς στο **Εθνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87)**. Δίνονται στον Πίνακα 12 που ακολουθεί:

Πίνακας 12 Οι συντεταγμένες των θέσεων δειγματοληψίας στο σύστημα **ΕΓΣΑ '87**

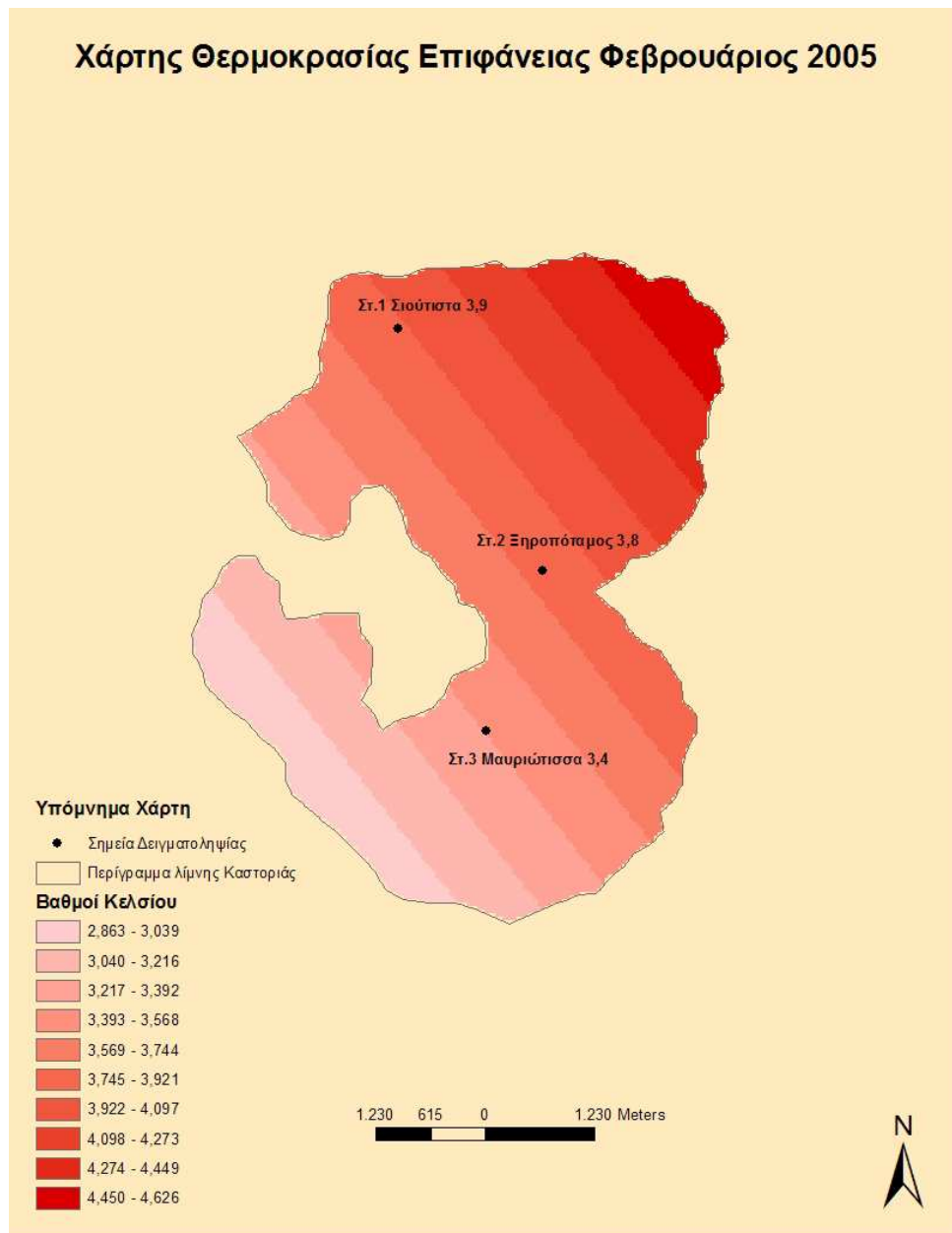
Α/Α	Σημεία Δειγματοληψίας	Συντεταγμένες	
		X	Y
1	Σιούτιστα	269705,32	4491595,66
2	Ξηροπόταμος	271328,31	4488858,58
3	Μαυριώτισσα	270695,62	4487043,03
4	Β. Παραλία	269025,02	4489330,01
5	Σταυρός	268261,14	4488074,06

Στην συνέχεια παραθέτονται οι χάρτες κλίμακας 1: 50.000 που προκύπτουν από την εφαρμογή των μεθόδων παρεμβολής IDW και Splines για τους μήνες Φεβρουάριο, Ιούλιο, Οκτώβριο του 2005 και για τους μήνες Φεβρουάριο και Ιούλιο του 2006.

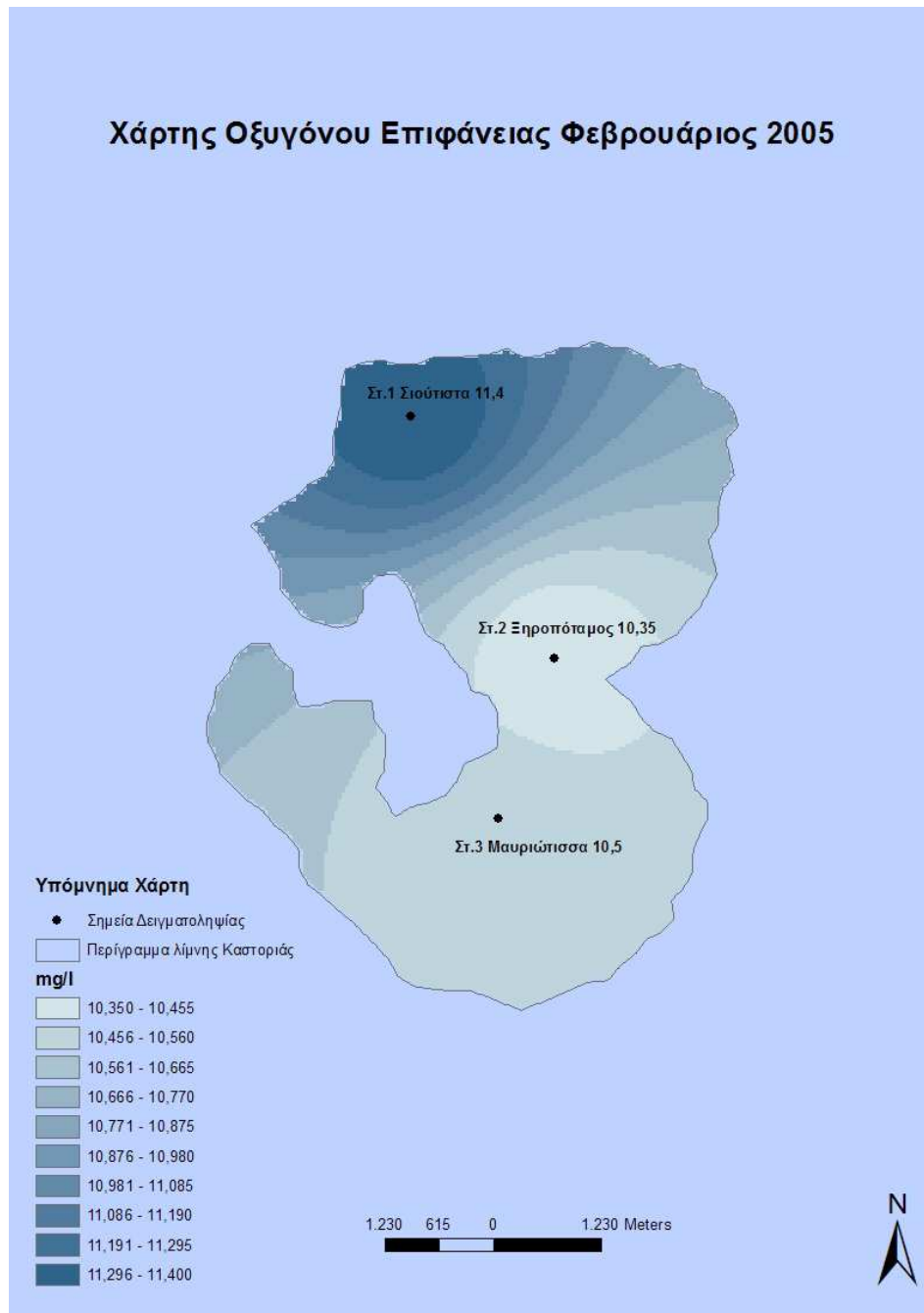
Συγκριτικά η μέθοδος IDW αποδεικνύεται ως η πιο κατάλληλη σε σχέση με τη μέθοδο splines, όπως αναλυτικά θα εξηγηθεί στη συνέχεια.



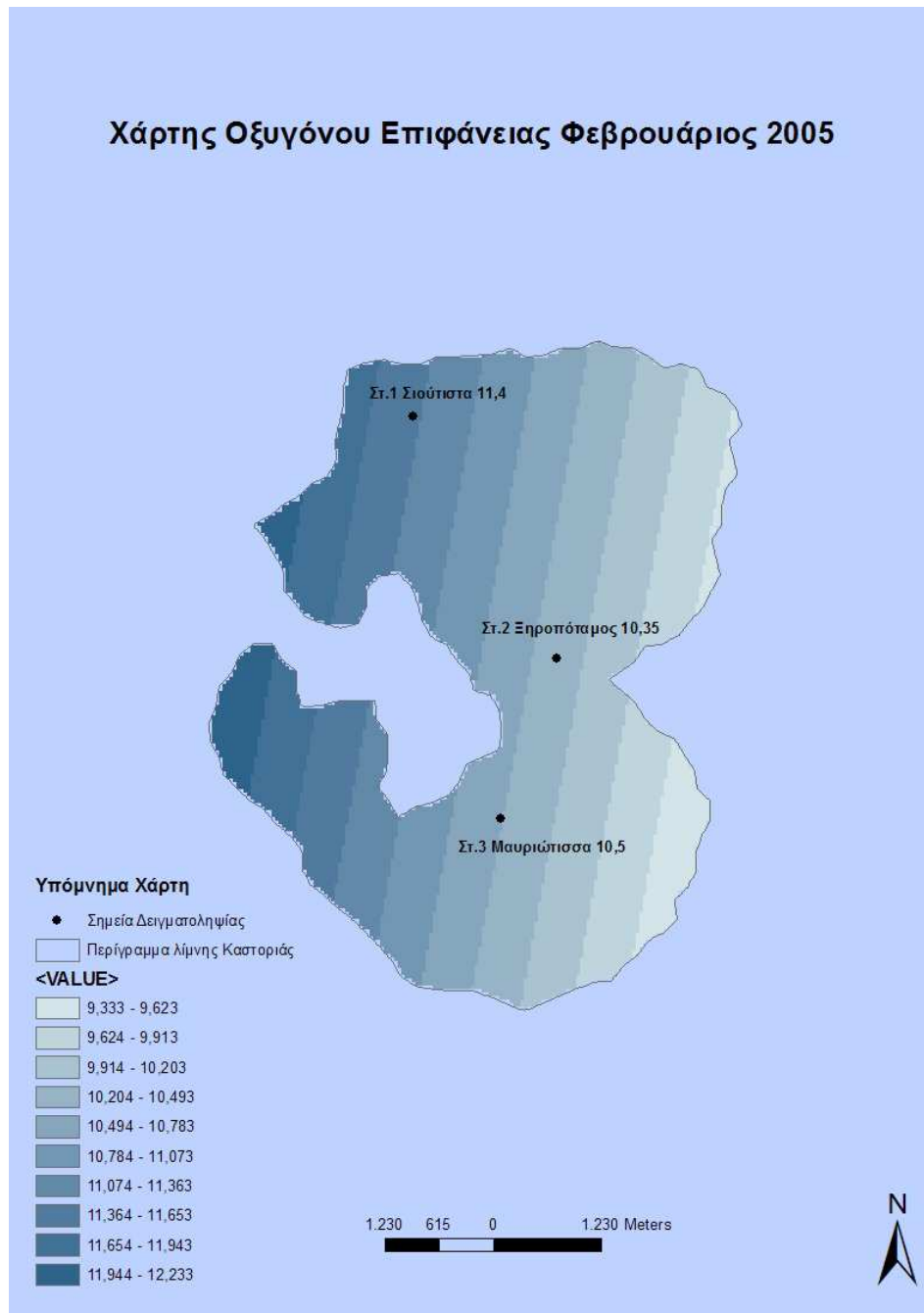
Εικόνα 41 Χάρτης Θερμοκρασίας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2005 με την Μέθοδο IDW.



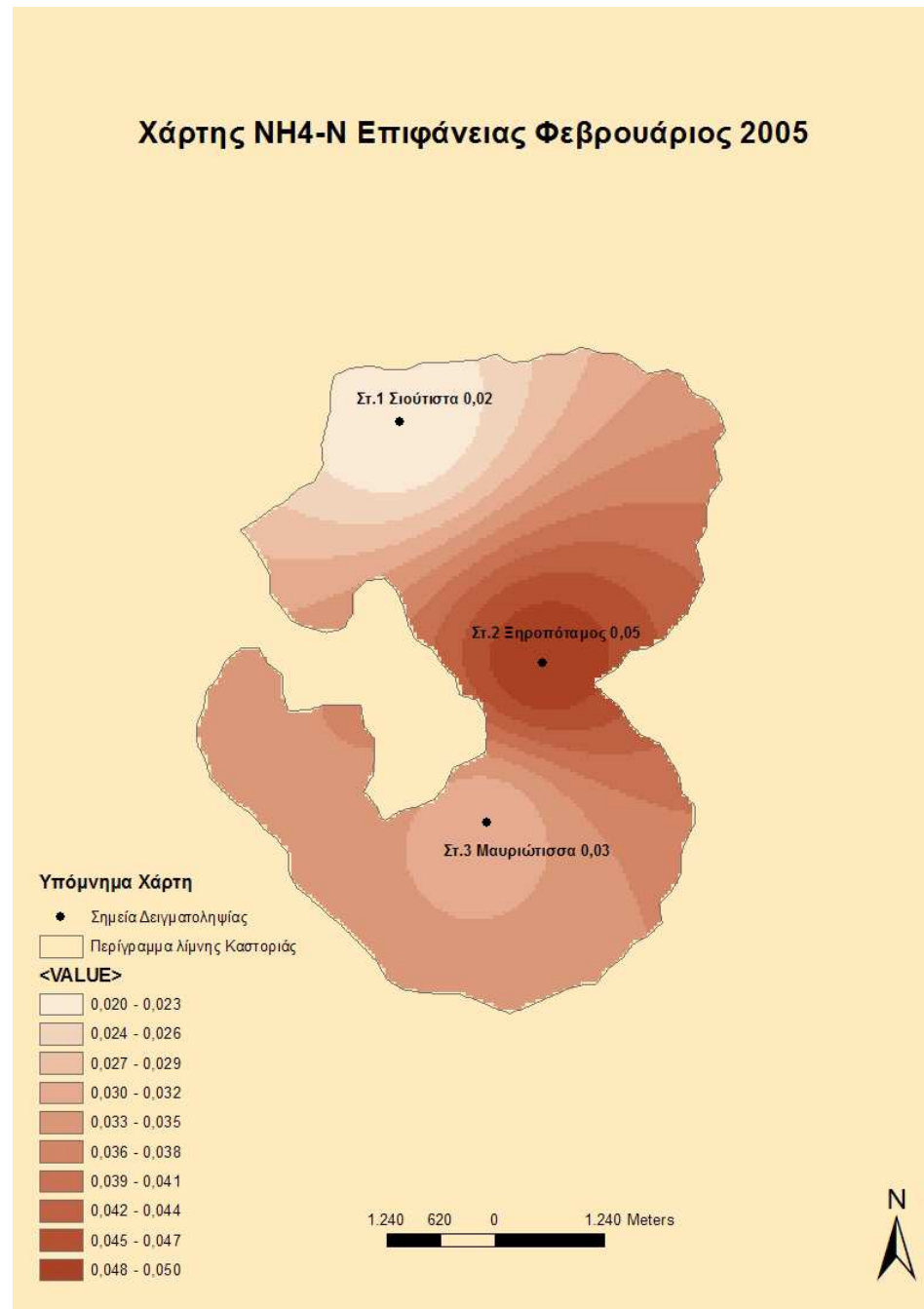
Εικόνα 42 Χάρτης Θερμοκρασίας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2005 με την μέθοδο Splines.



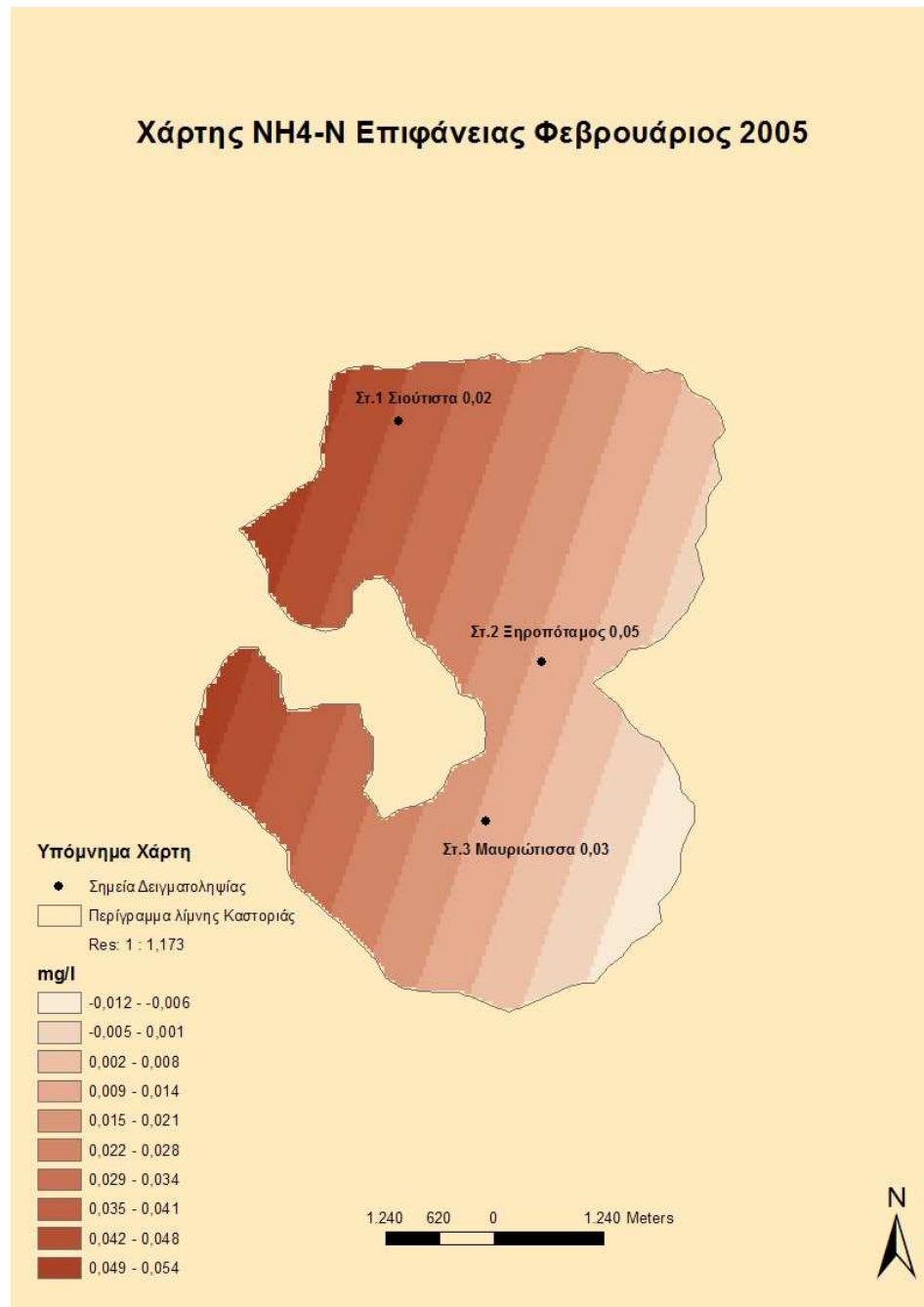
Εικόνα 43 Χάρτης Οξυγόνου επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2005
με την μέθοδο IDW



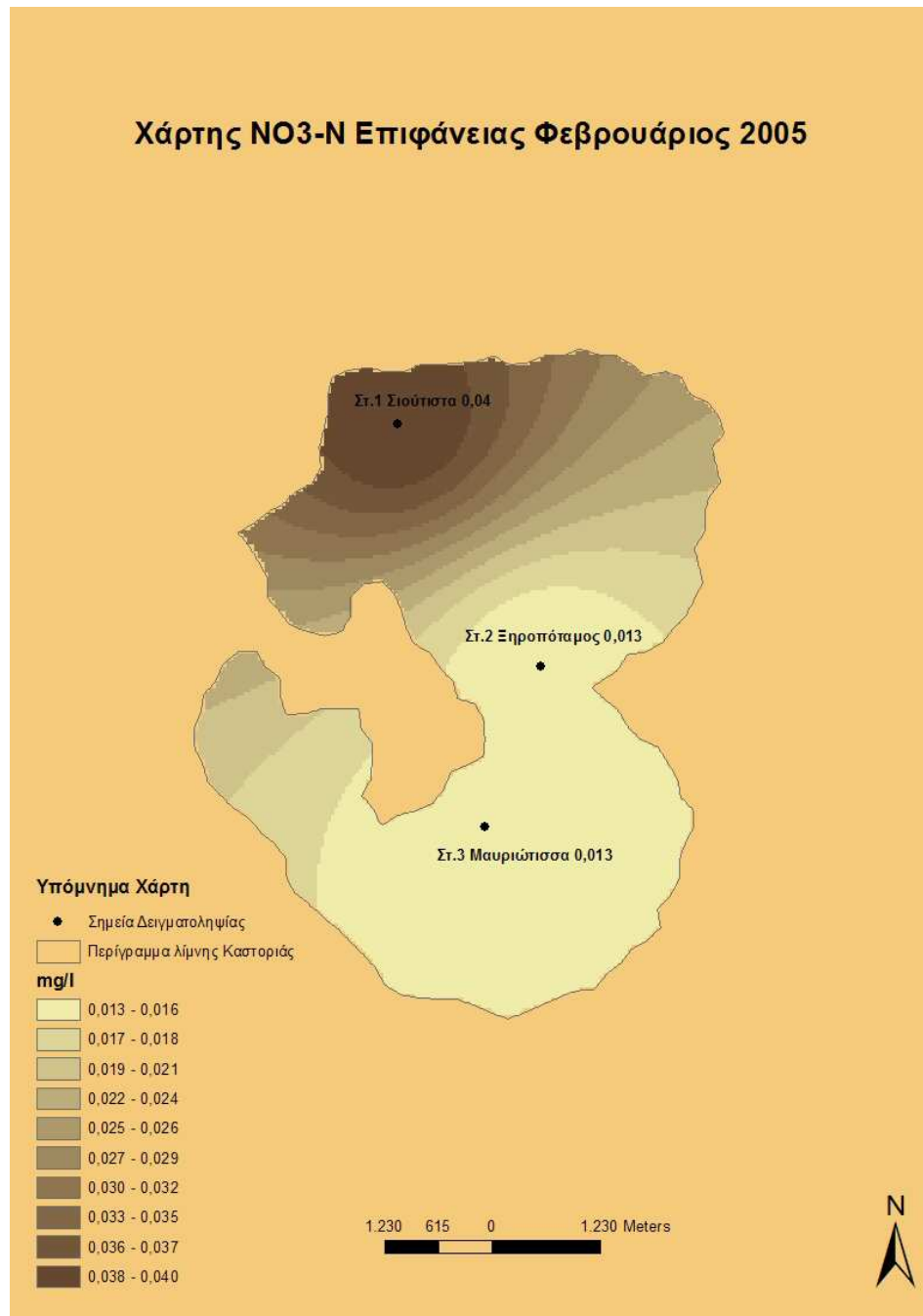
Εικόνα 44 Χάρτης Οξυγόνου επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2005
με την μέθοδο Splines



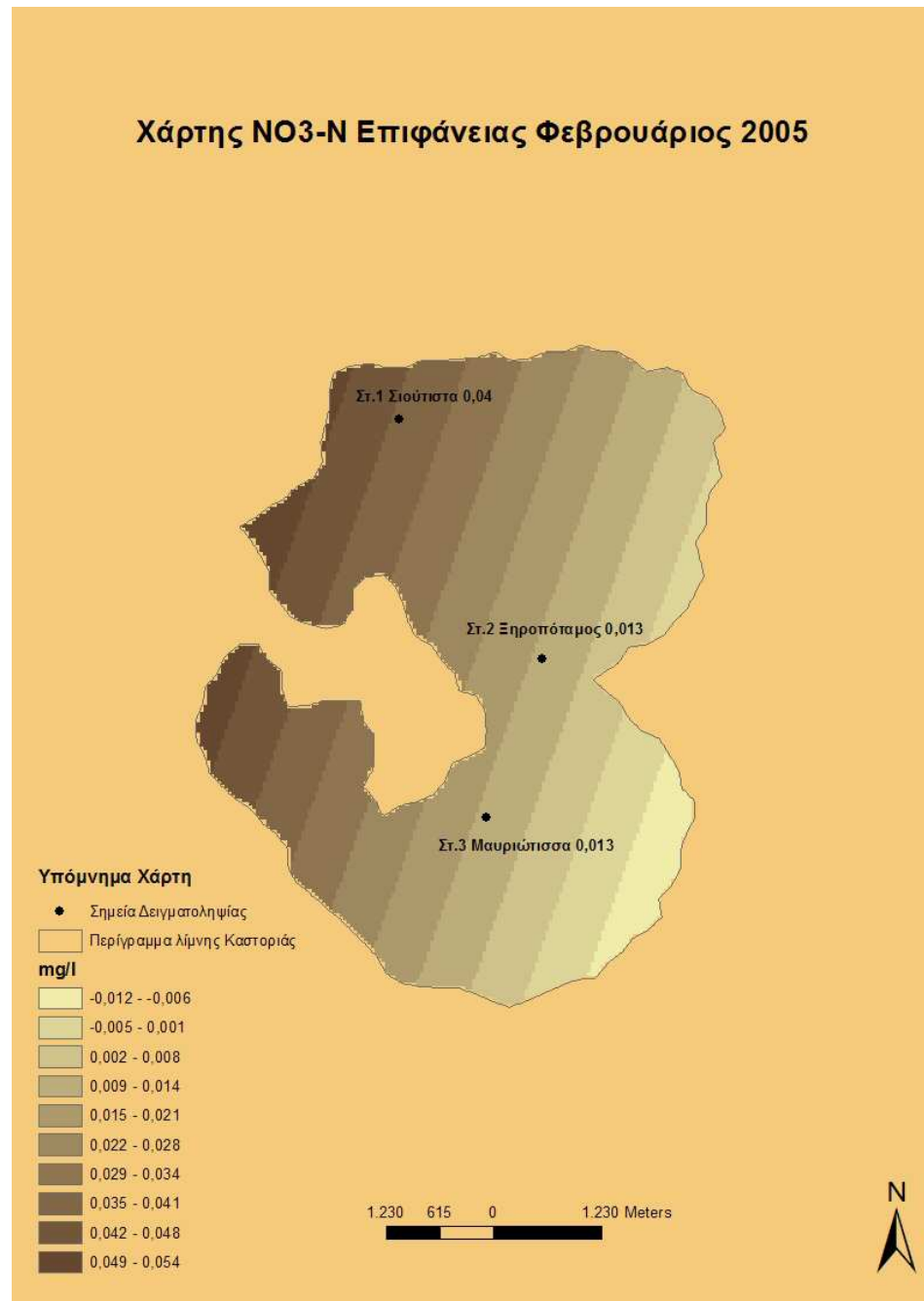
Εικόνα 45 Χάρτης NH₄-N επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2005 με την μέθοδο IDW



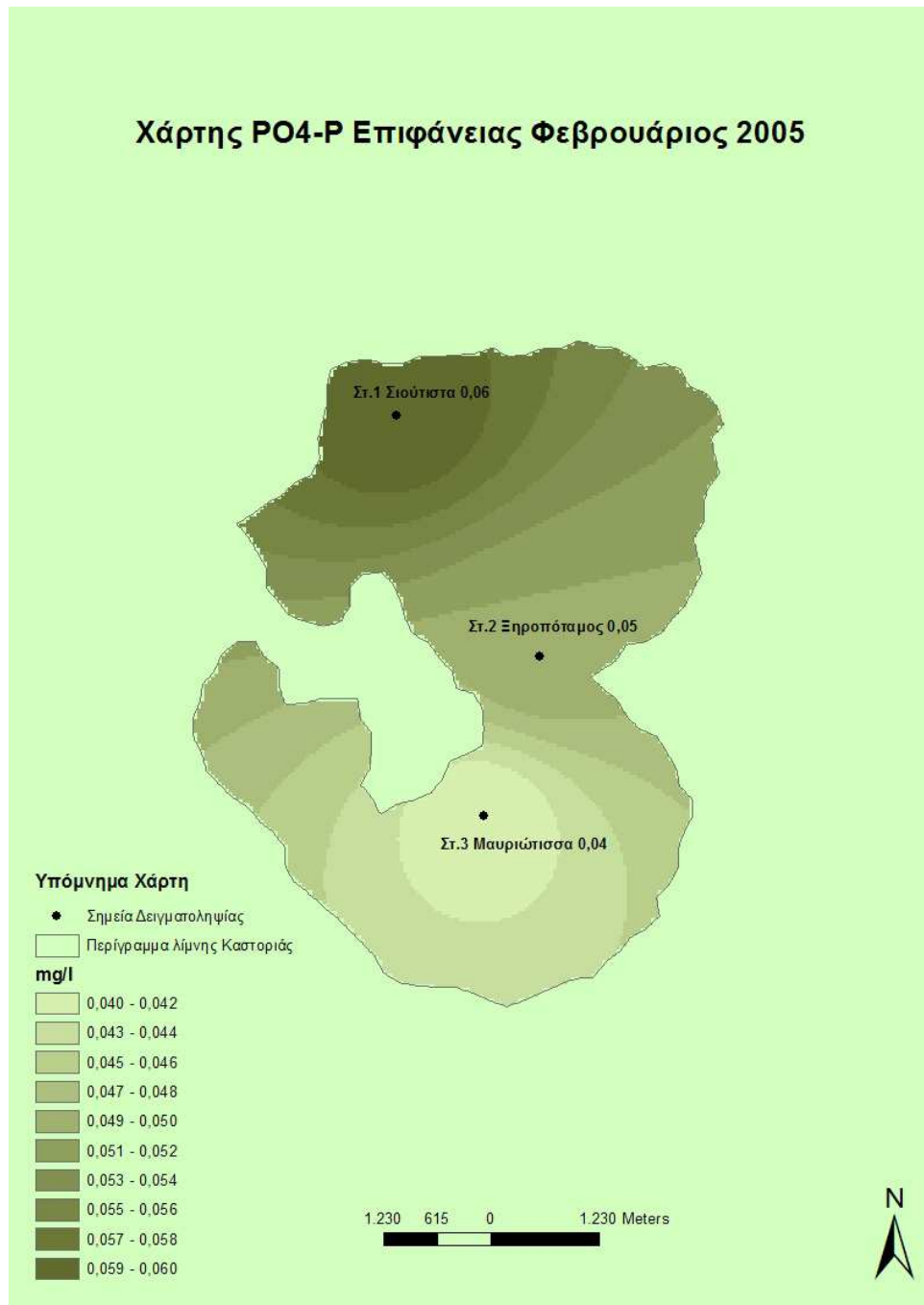
Εικόνα 46 Χάρτης NH₄-N επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2005 με την μέθοδο Splines



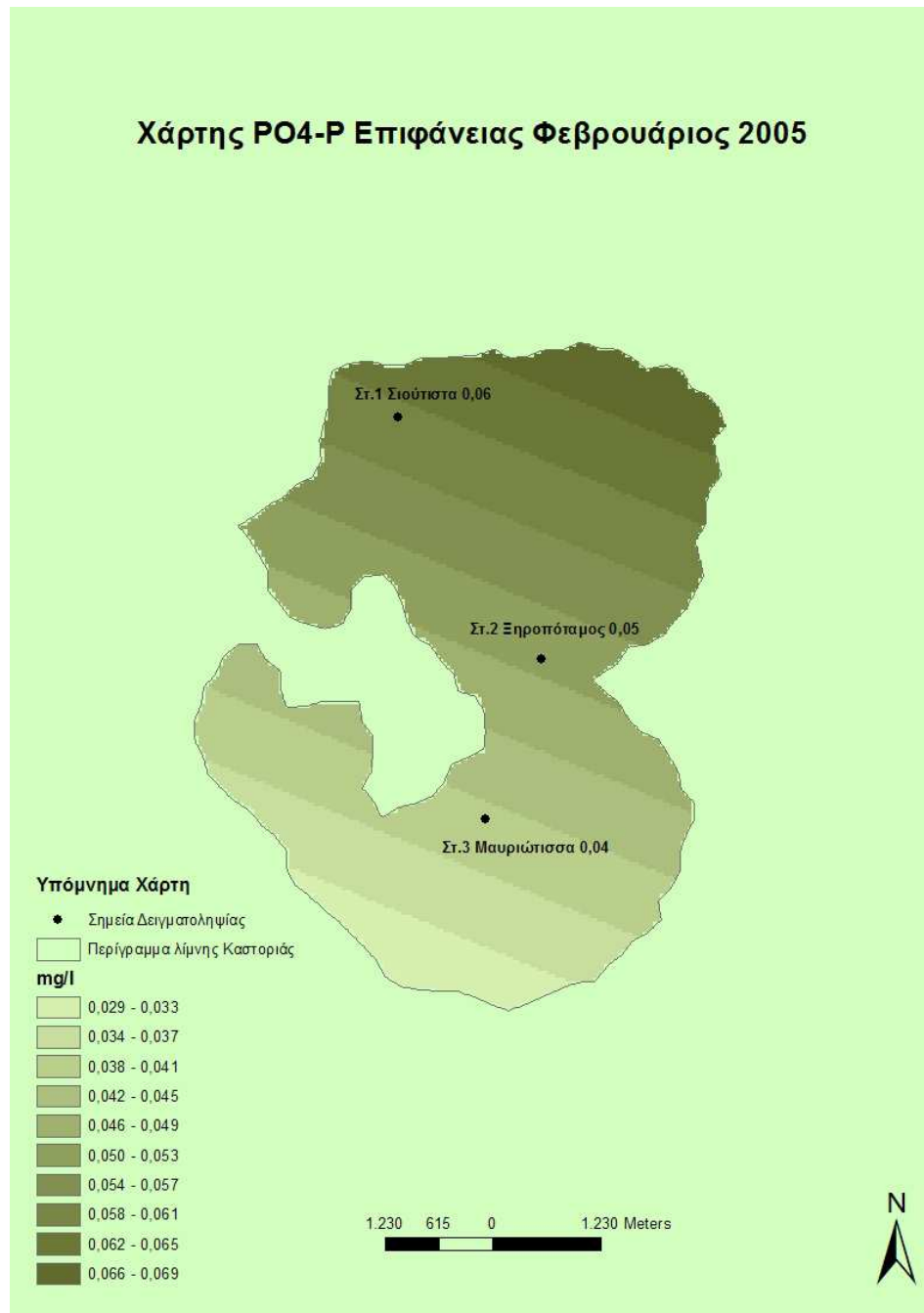
Εικόνα 47 Χάρτης NO₃-N επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2005 με την μέθοδο IDW.



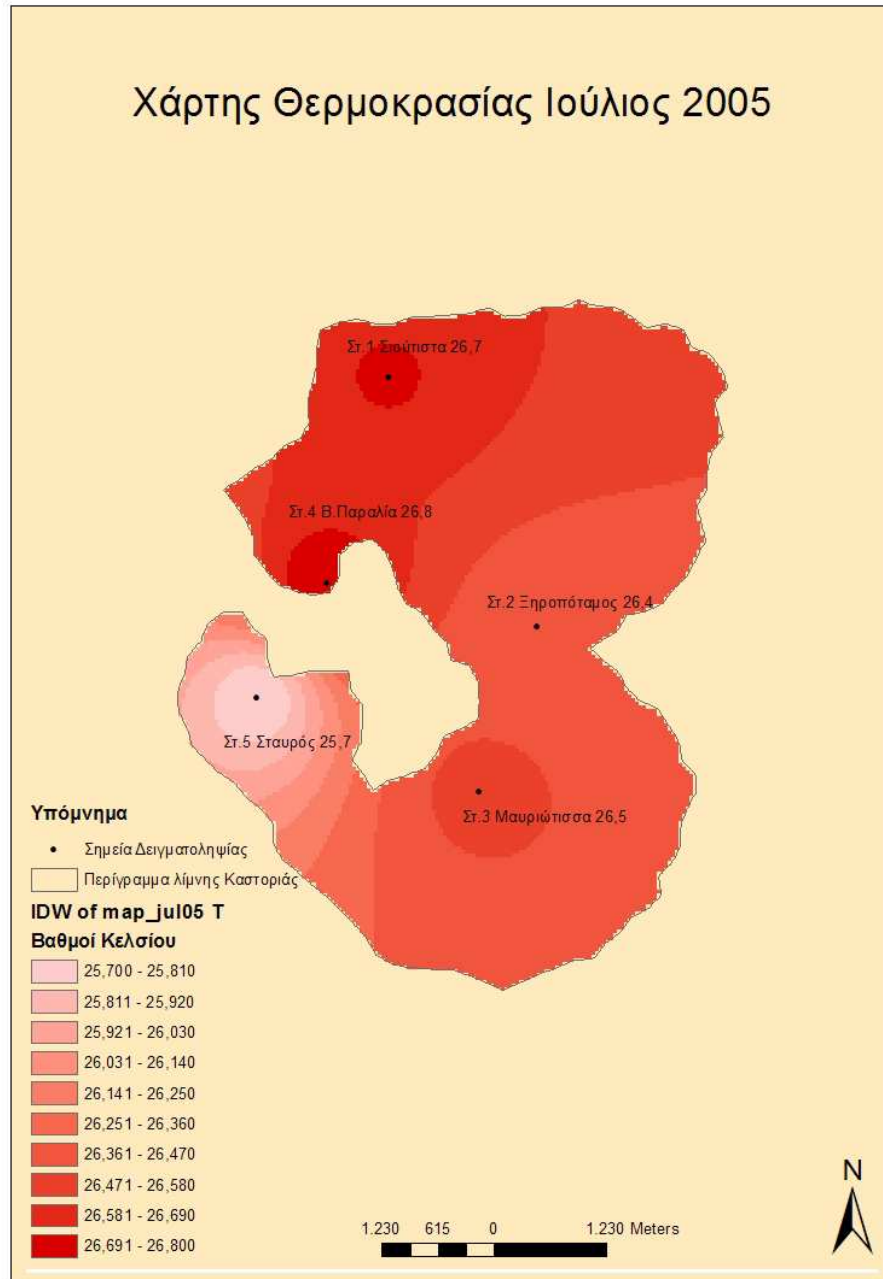
Εικόνα 48 Χάρτης NO₃-N επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2005 με την μέθοδο Splines.



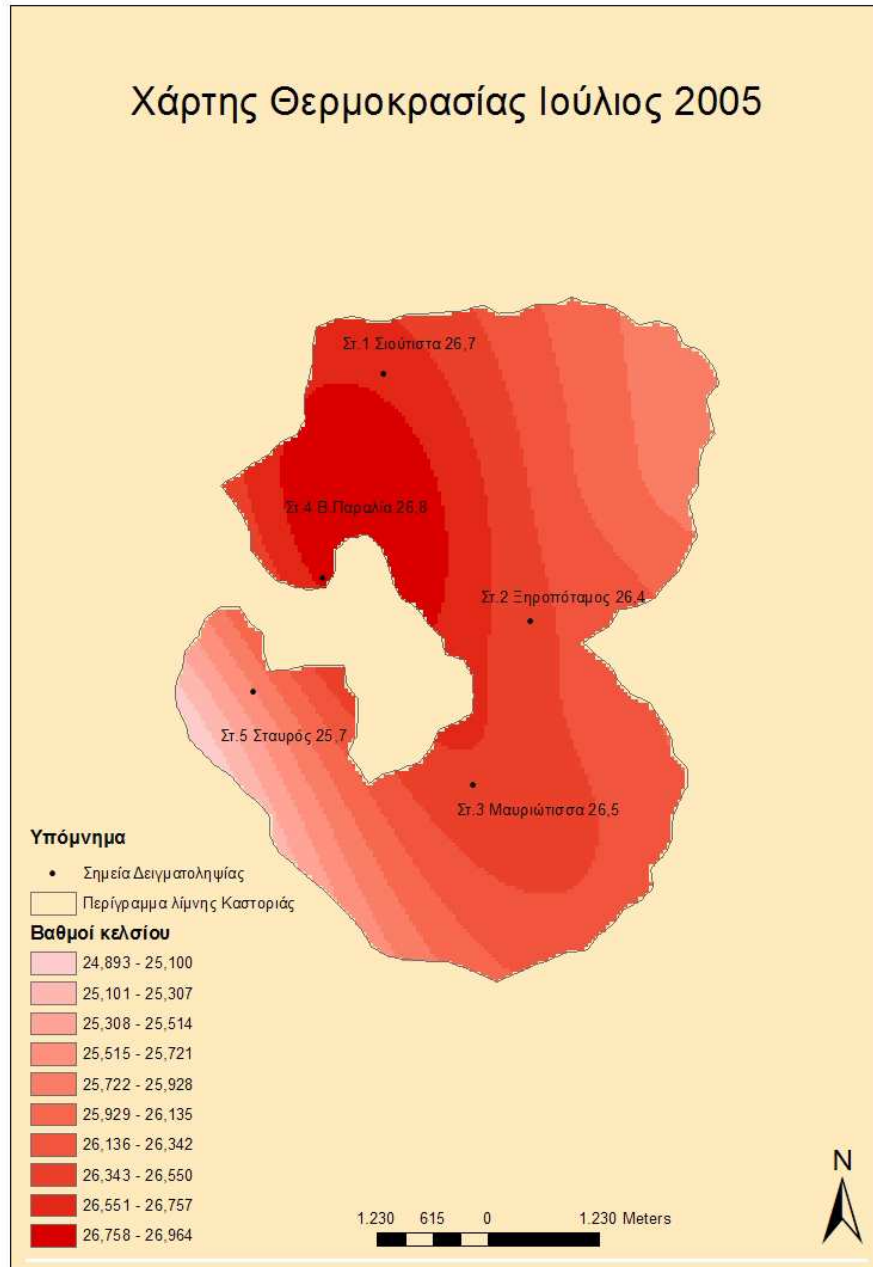
Εικόνα 49 Χάρτης PO₄-P επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2005 με την μέθοδο IDW.



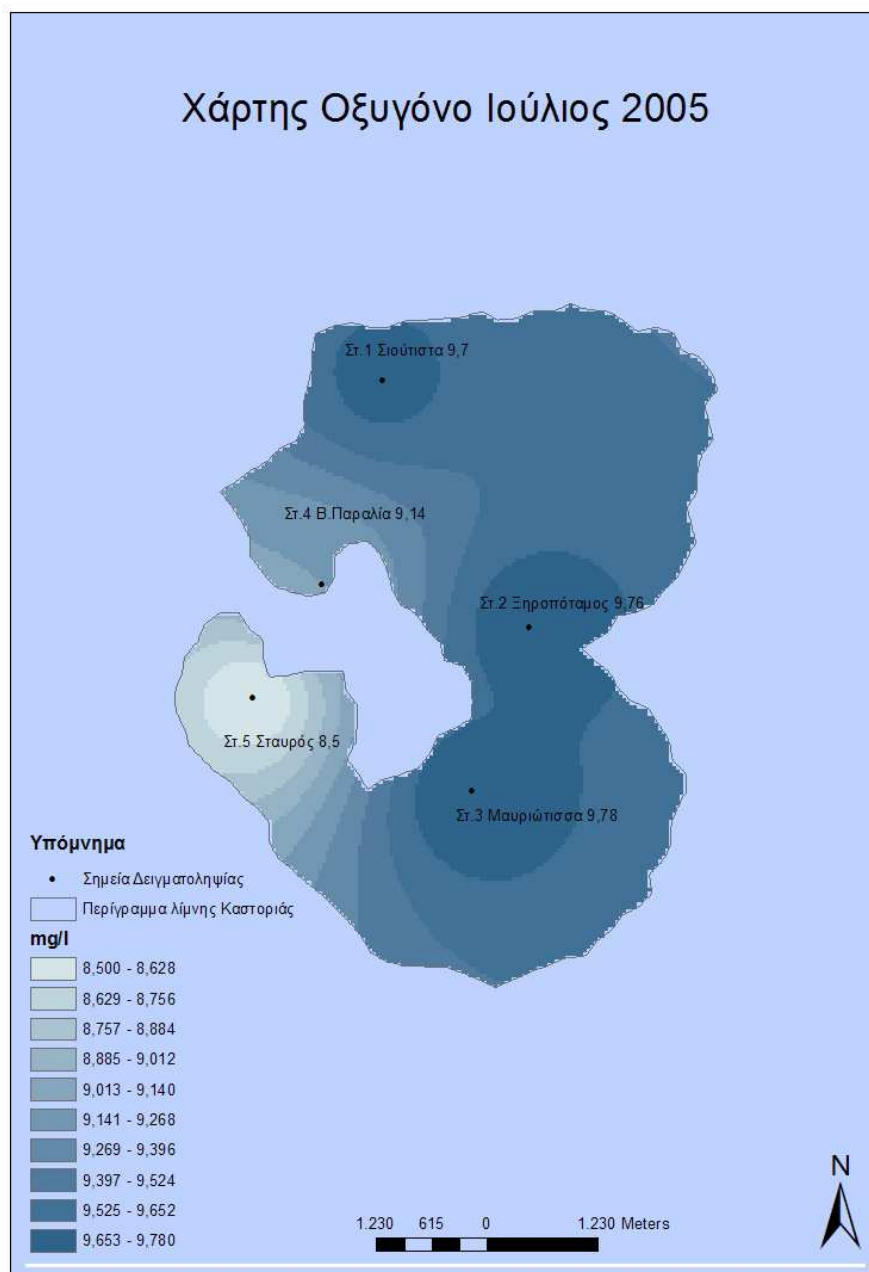
Εικόνα 50 Χάρτης PO₄-P επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2005 με την μέθοδο Splines.



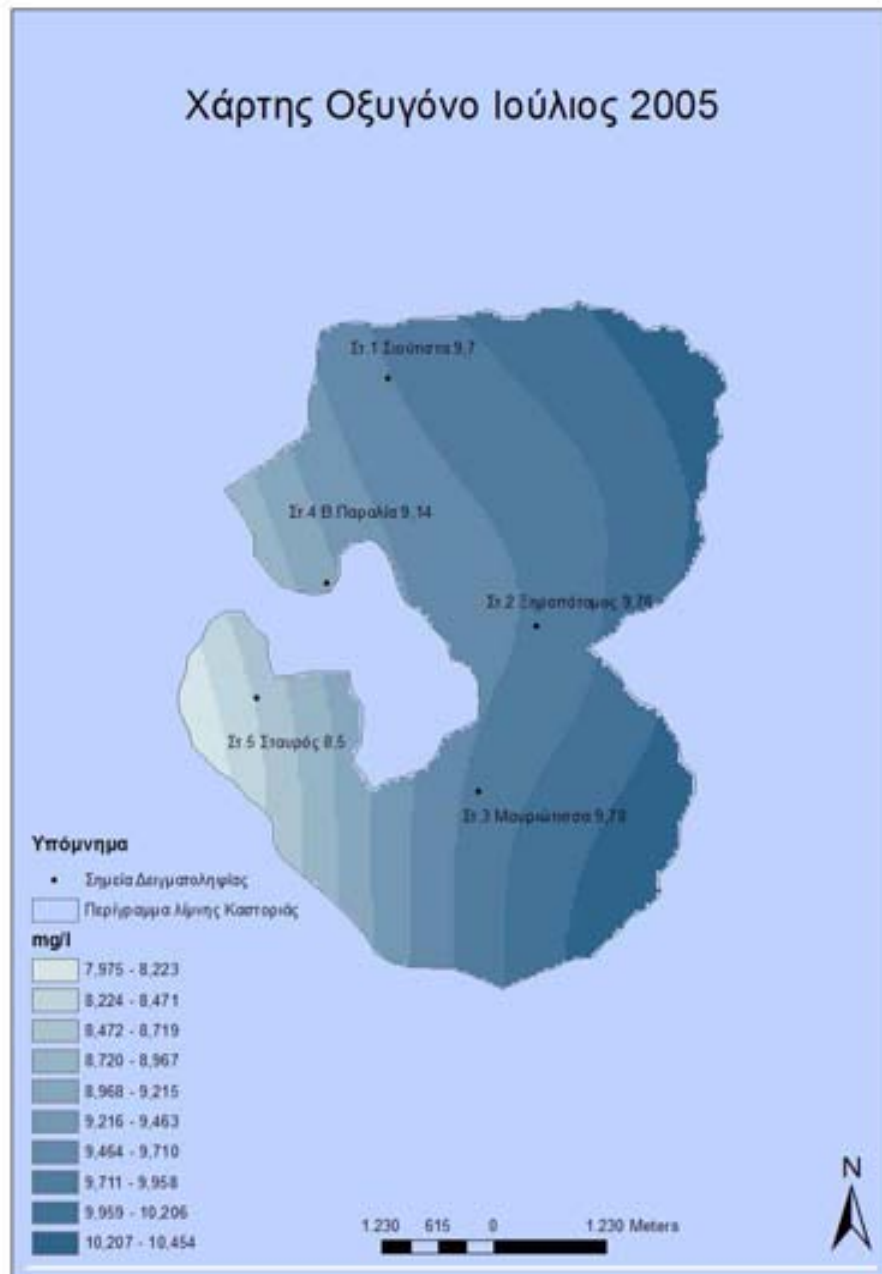
Εικόνα 51 Χάρτης Θερμοκρασίας επιφάνειας για τον μήνα Ιούλιο του 2005 με την μέθοδο IDW.



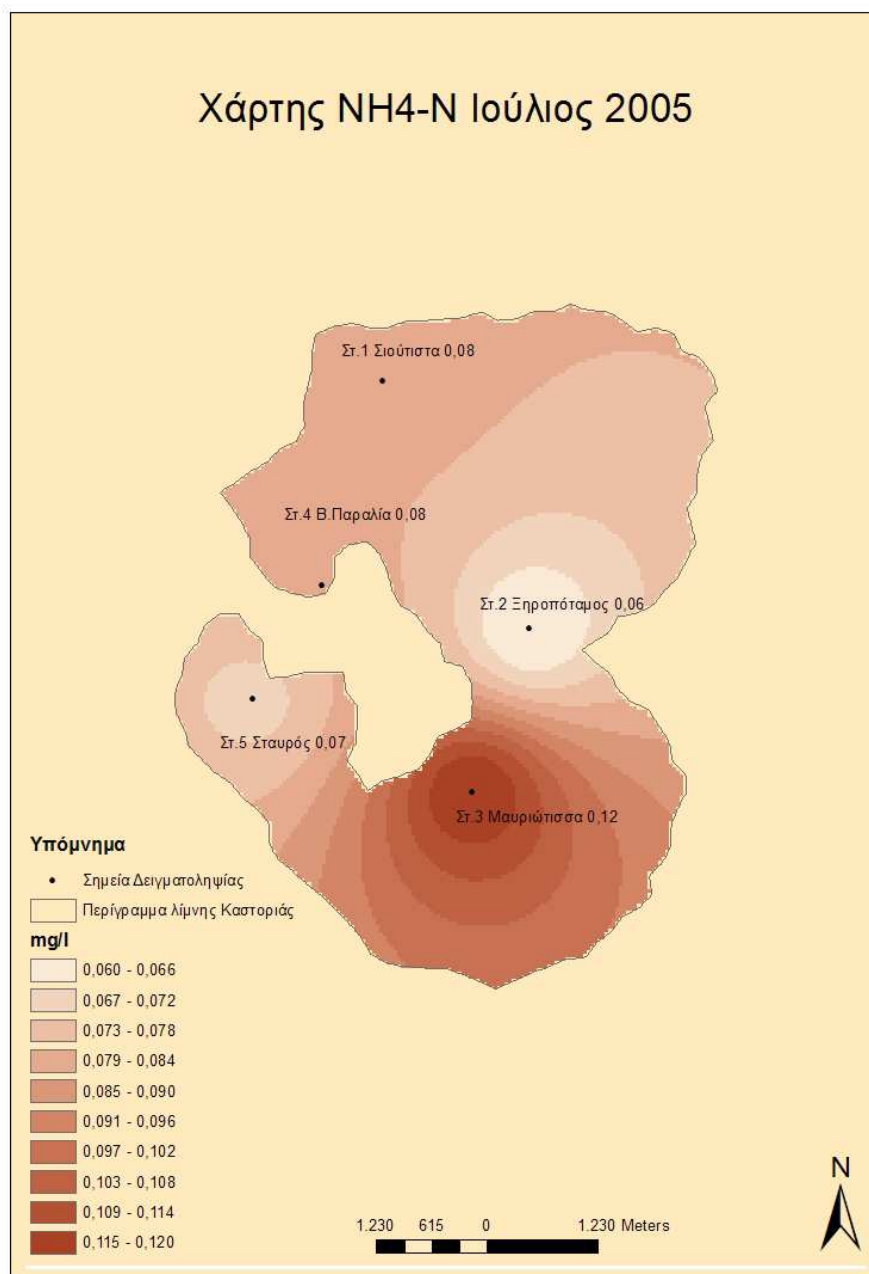
Εικόνα 52 Χάρτης Θερμοκρασίας επιφάνειας για τον μήνα Ιούλιο του 2005 με την μέθοδο Splines.



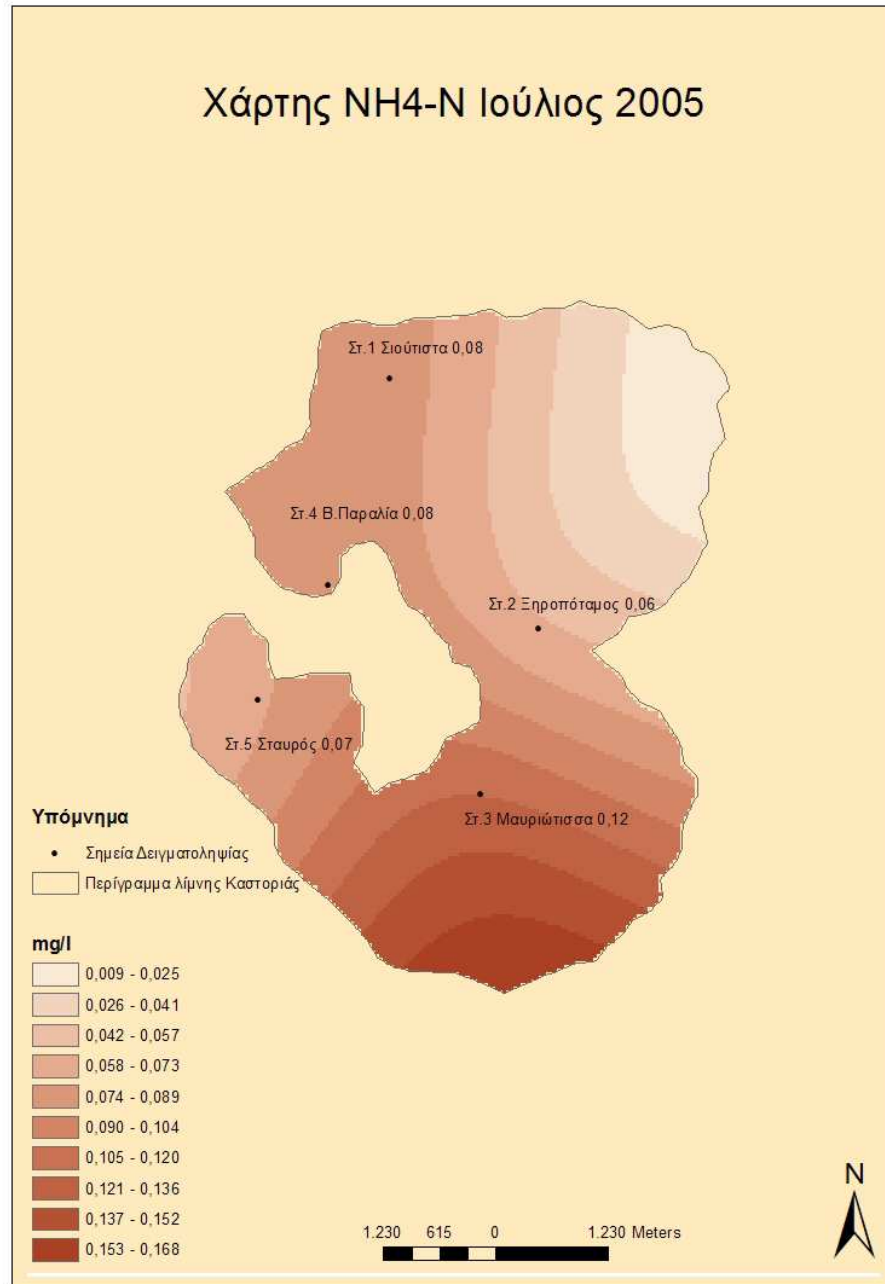
Εικόνα 53 Χάρτης Οξυγόνου επιφάνειας για τον μήνα Ιούλιο του 2005 με την μέθοδο IDW.



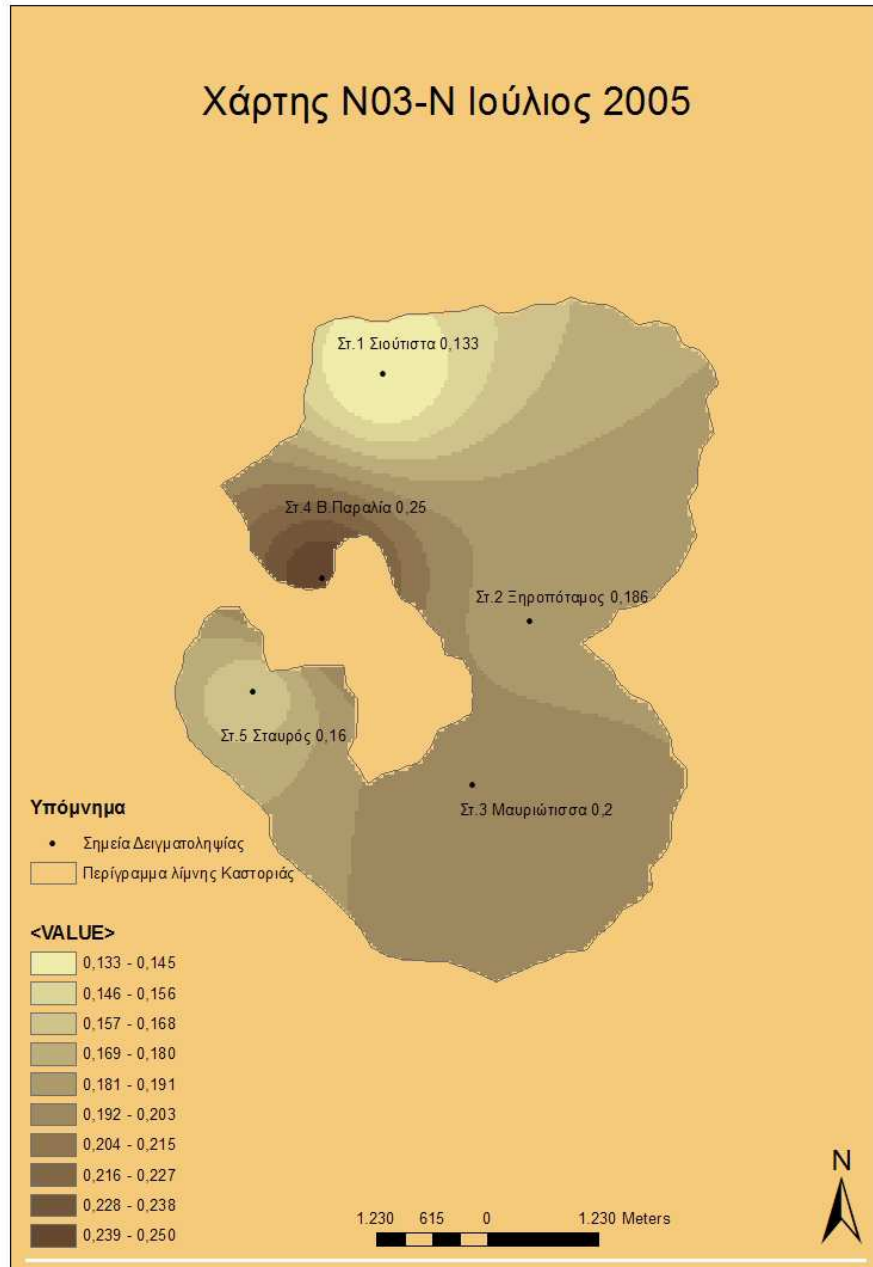
Εικόνα 54 Χάρτης Οξυγόνου επιφάνειας για τον μήνα Ιούλιο του 2005 με την μέθοδο Splines.



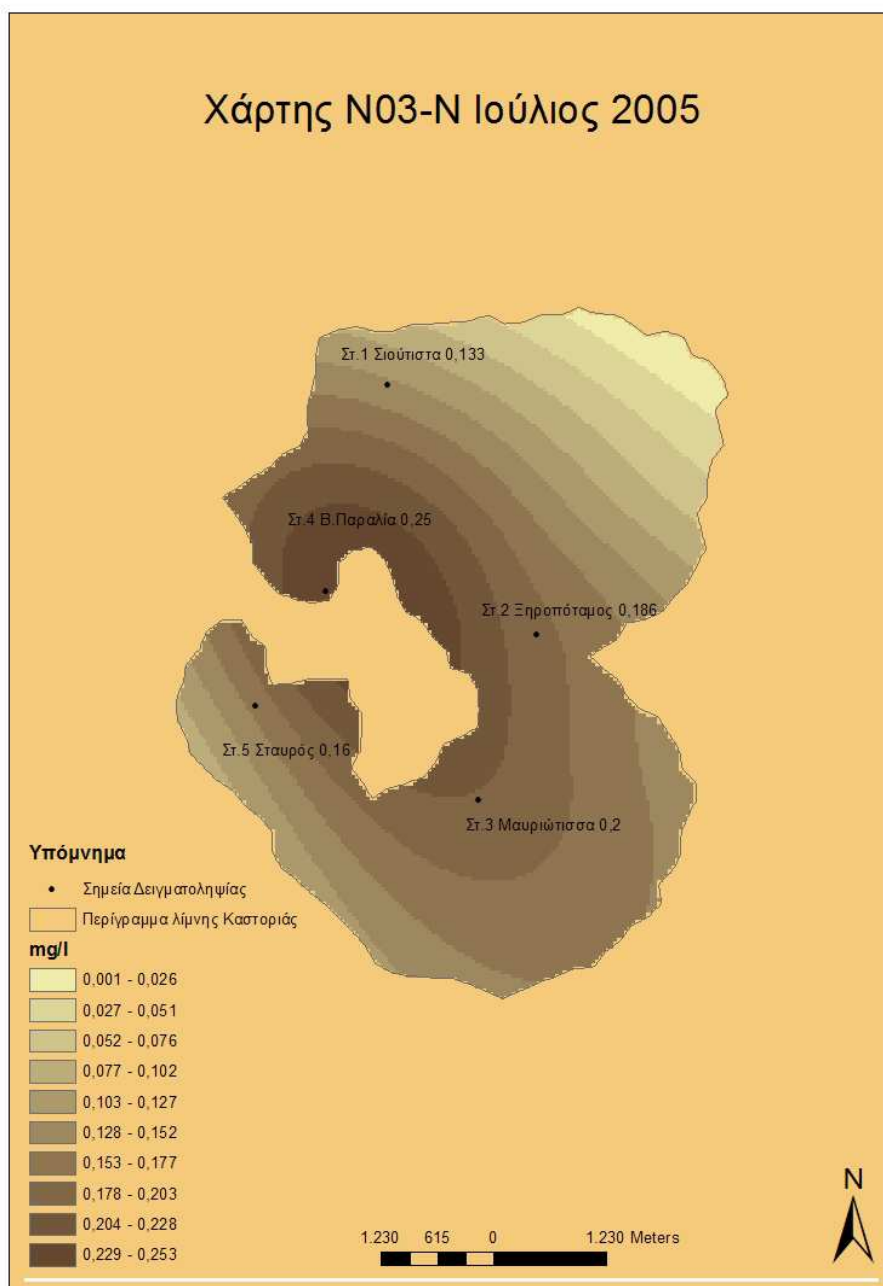
Εικόνα 55 Χάρτης NH₄-N επιφάνειας για τον μήνα Ιούλιο του 2005 με την μέθοδο IDW



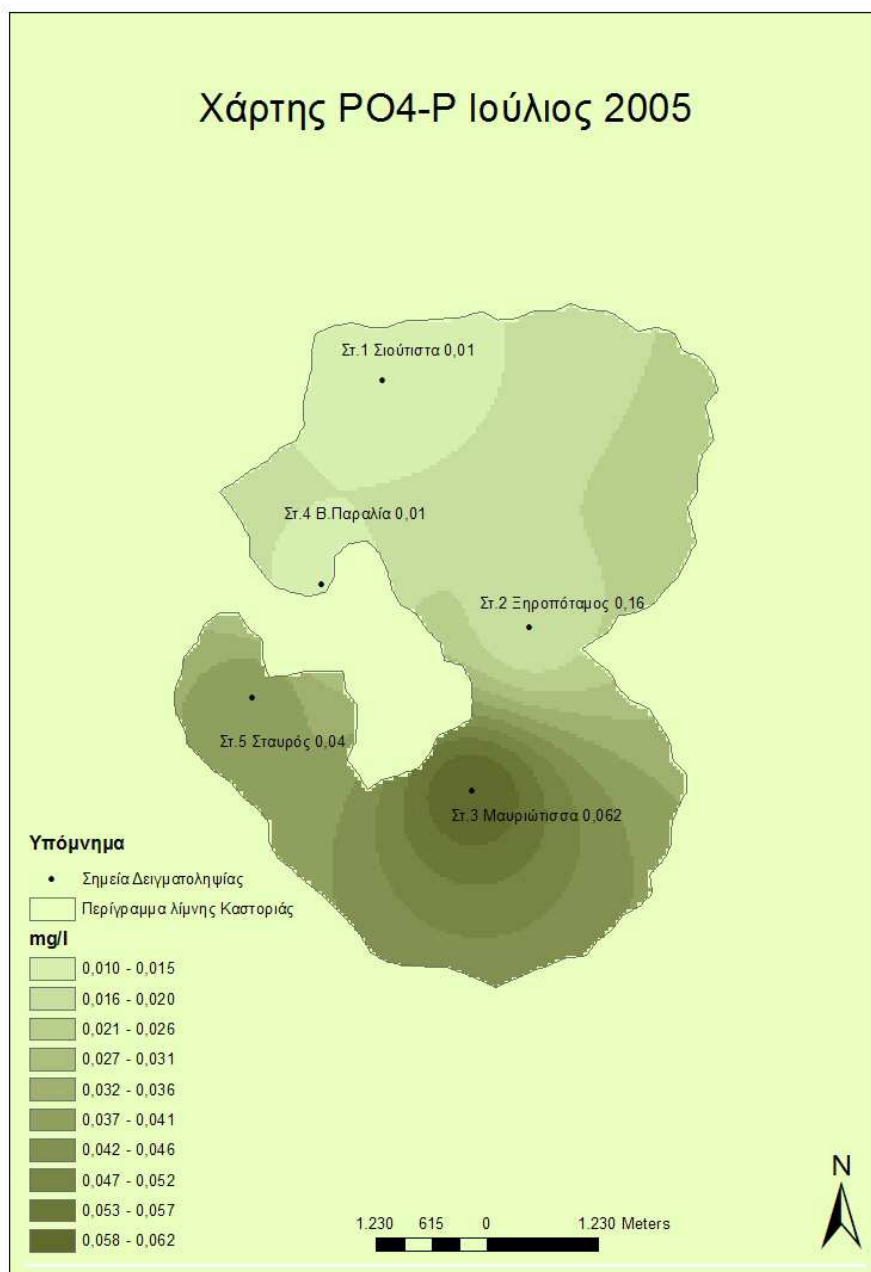
Εικόνα 56 Χάρτης NH₄-N επιφάνειας για τον μήνα Ιούλιο του 2005 με την μέθοδο Splines.



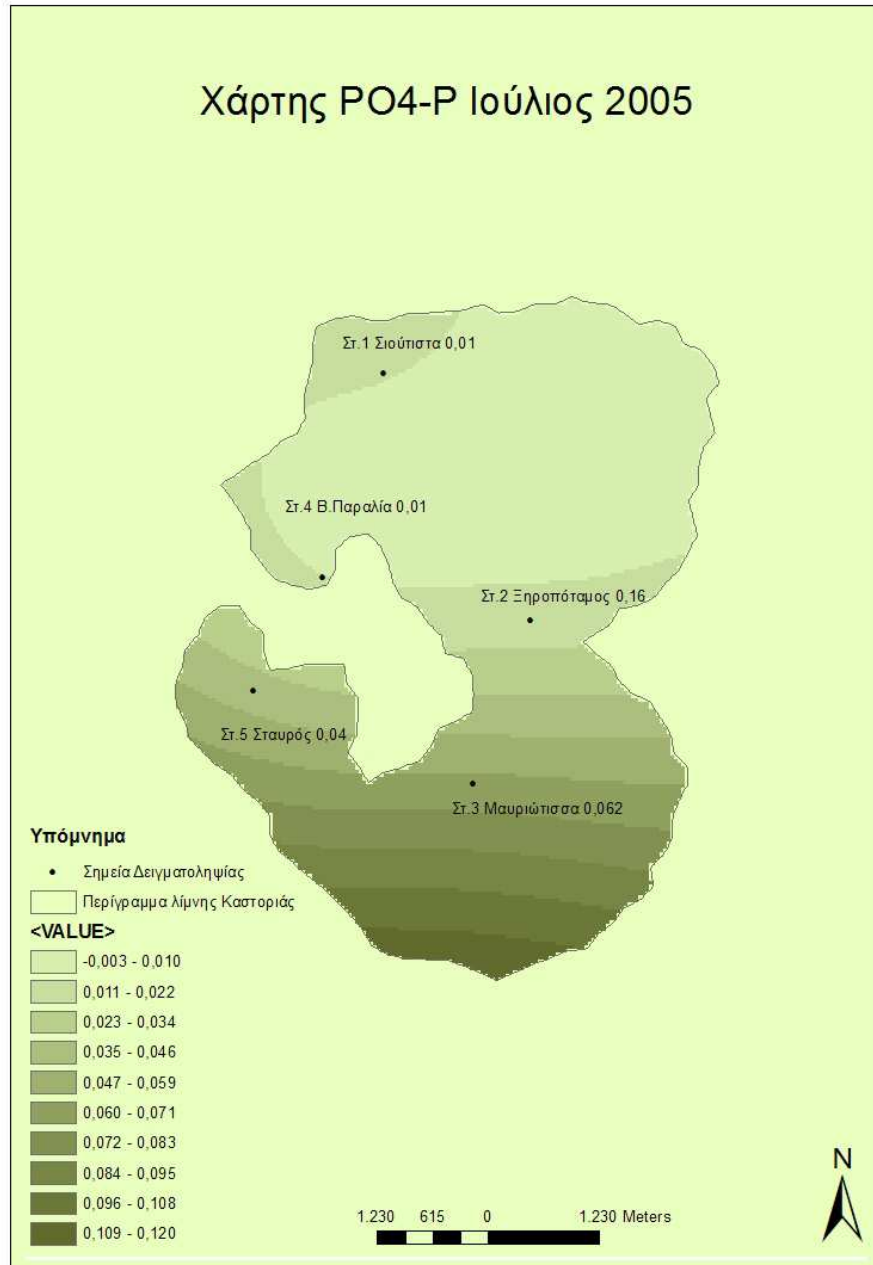
Εικόνα 57 Χάρτης $\text{NO}_3\text{-N}$ επιφάνειας για τον μήνα Ιούλιο του 2005 με την μέθοδο IDW.



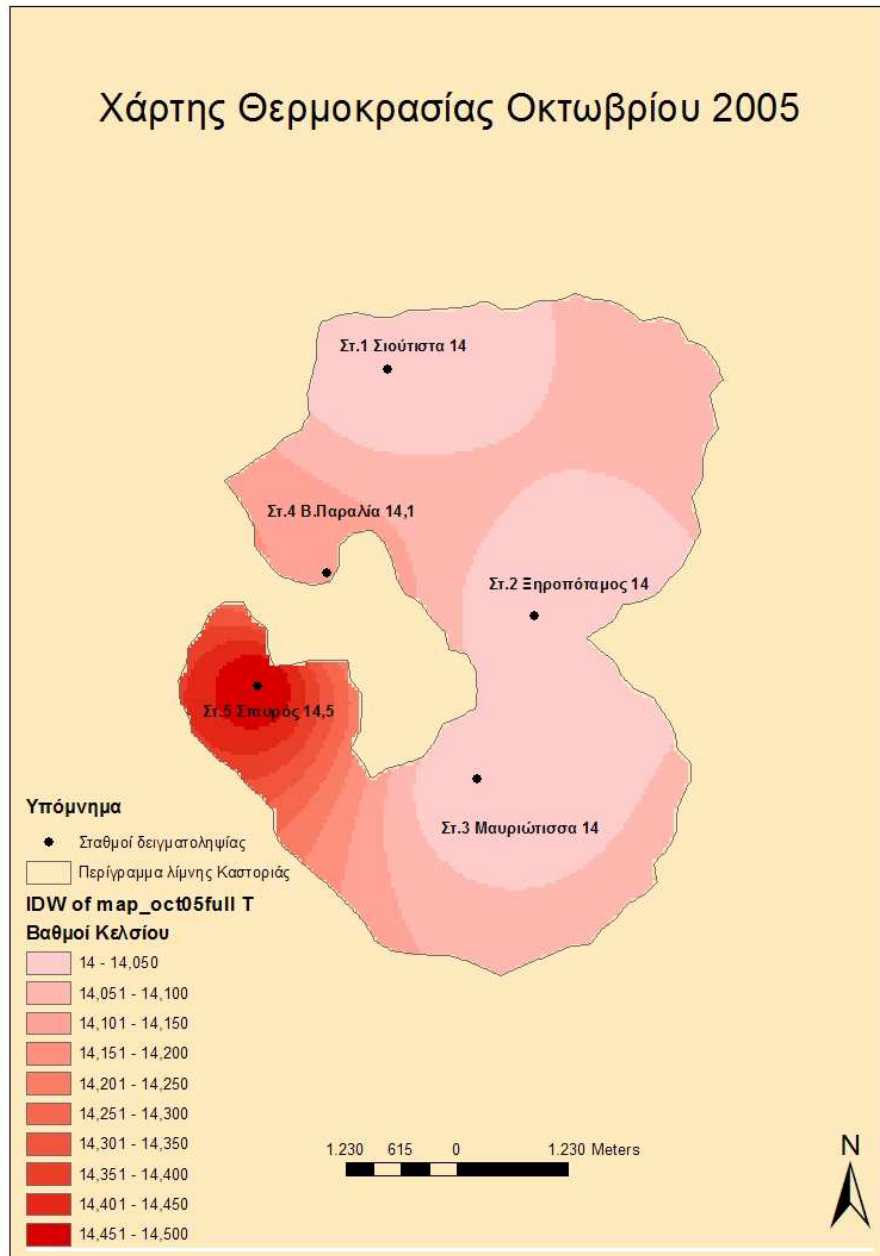
Εικόνα 58 Χάρτης $\text{NO}_3\text{-N}$ επιφάνειας για τον μήνα Ιούλιο του 2005 με την μέθοδο Splines .



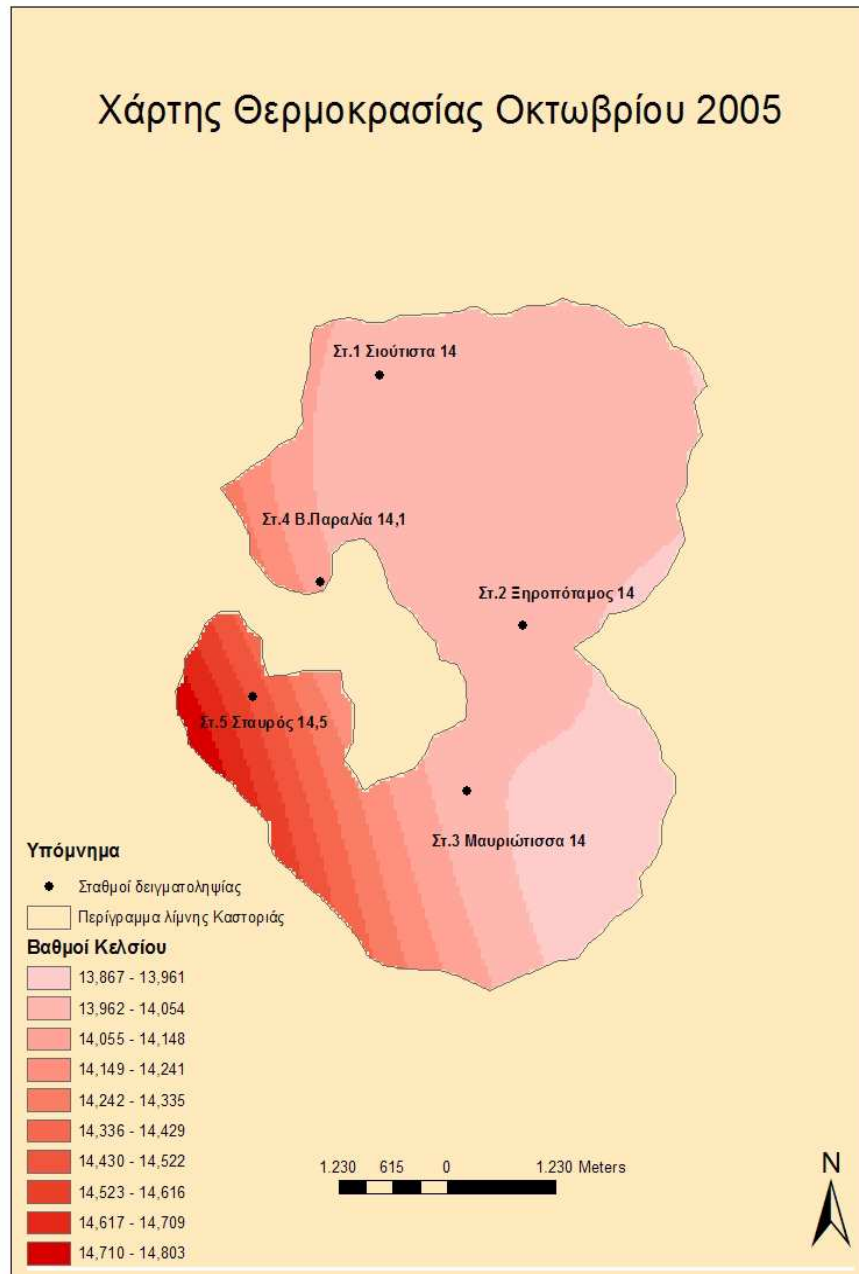
Εικόνα 59 Χάρτης PO₄-P επιφάνειας για τον μήνα Ιούλιο του 2005 με την μέθοδο IDW.



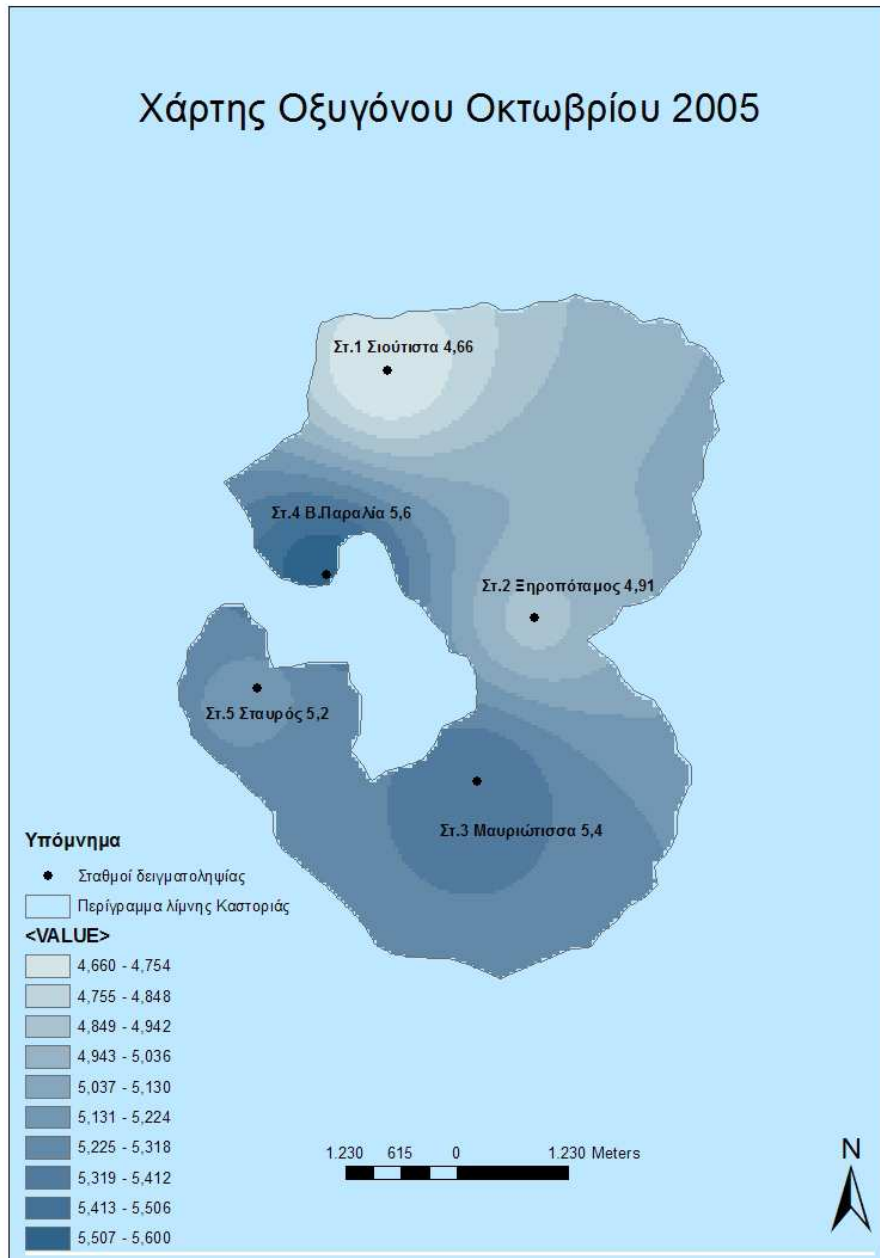
Εικόνα 60 Χάρτης PO₄-P επιφάνειας για τον μήνα Ιούλιο του 2005 με την μέθοδο Splines.



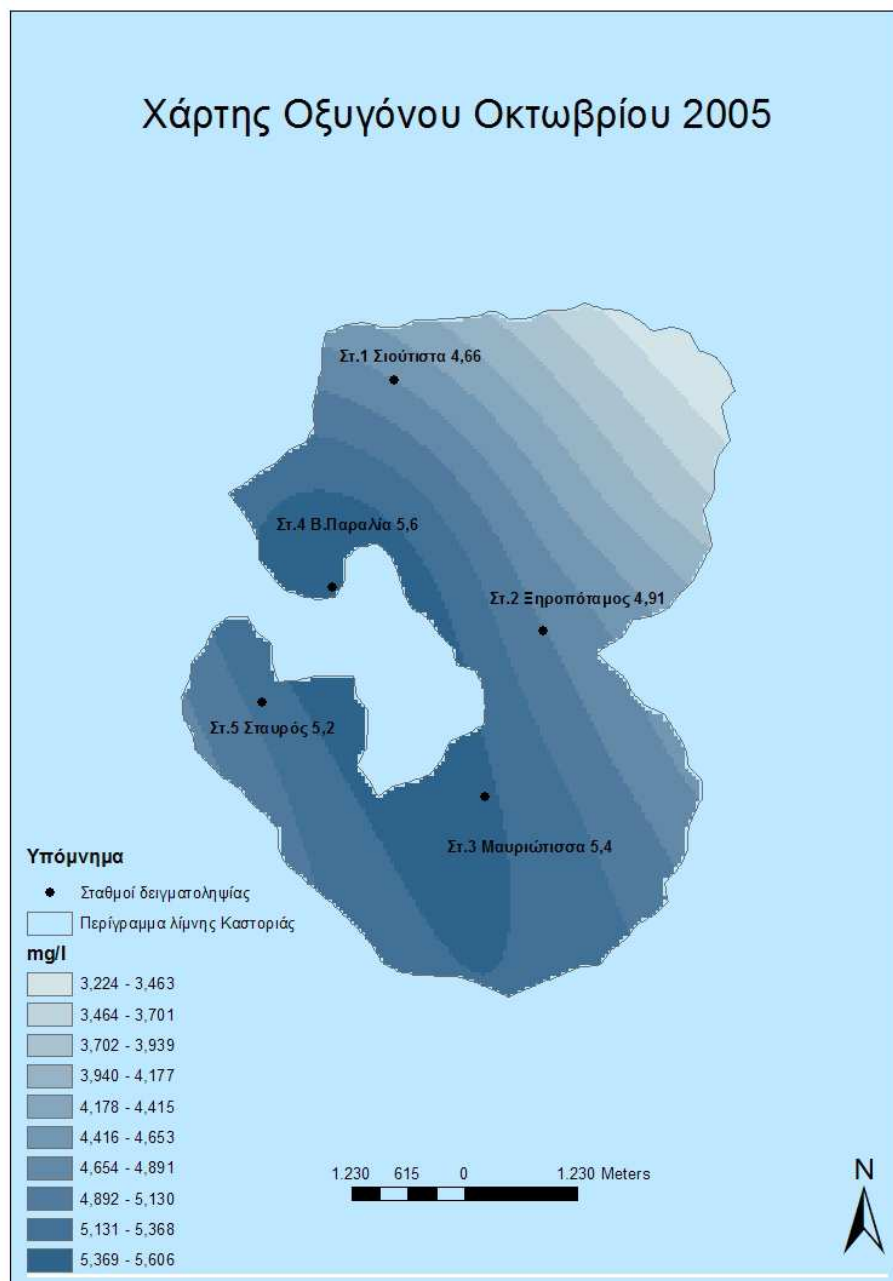
Εικόνα 61 Χάρτης Θερμοκρασίας επιφάνειας για τον μήνα Οκτώβριο του 2005 με την μέθοδο IDW.



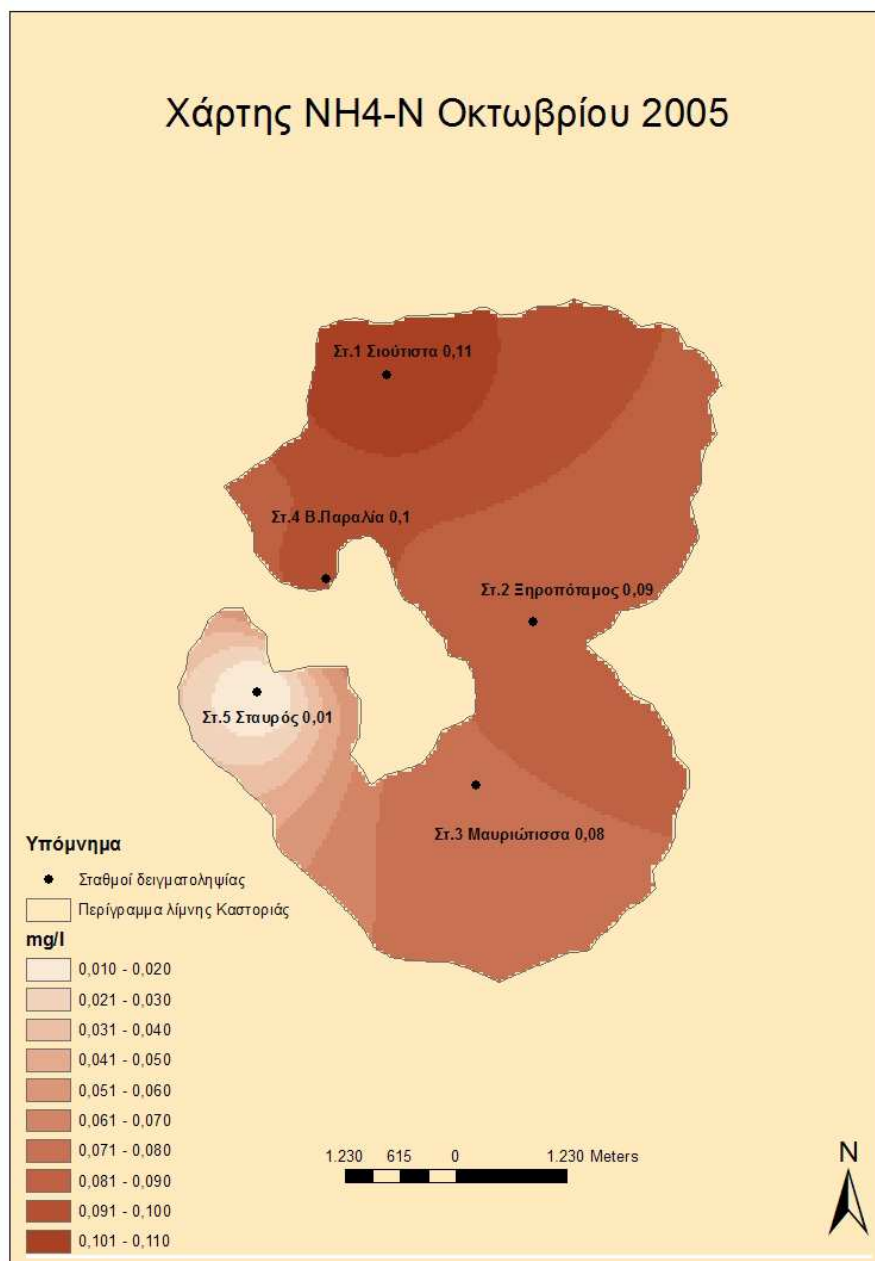
Εικόνα 62 Χάρτης Θερμοκρασίας επιφάνειας για τον μήνα Οκτώβριο του 2005 με την μέθοδο Splines.



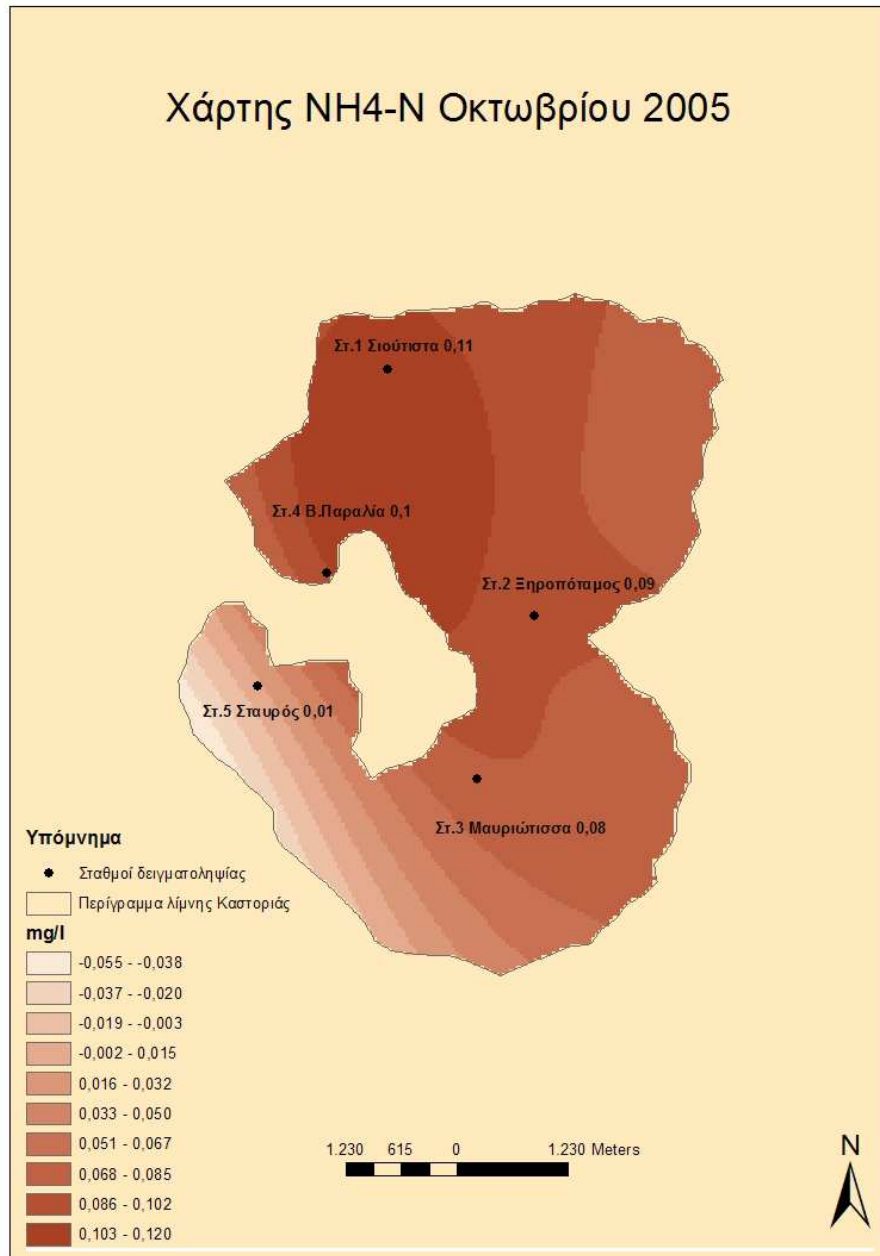
Εικόνα 63 Χάρτης Οξυγόνου επιφάνειας για τον μήνα Οκτώβριο του 2005 με την μέθοδο IDW.



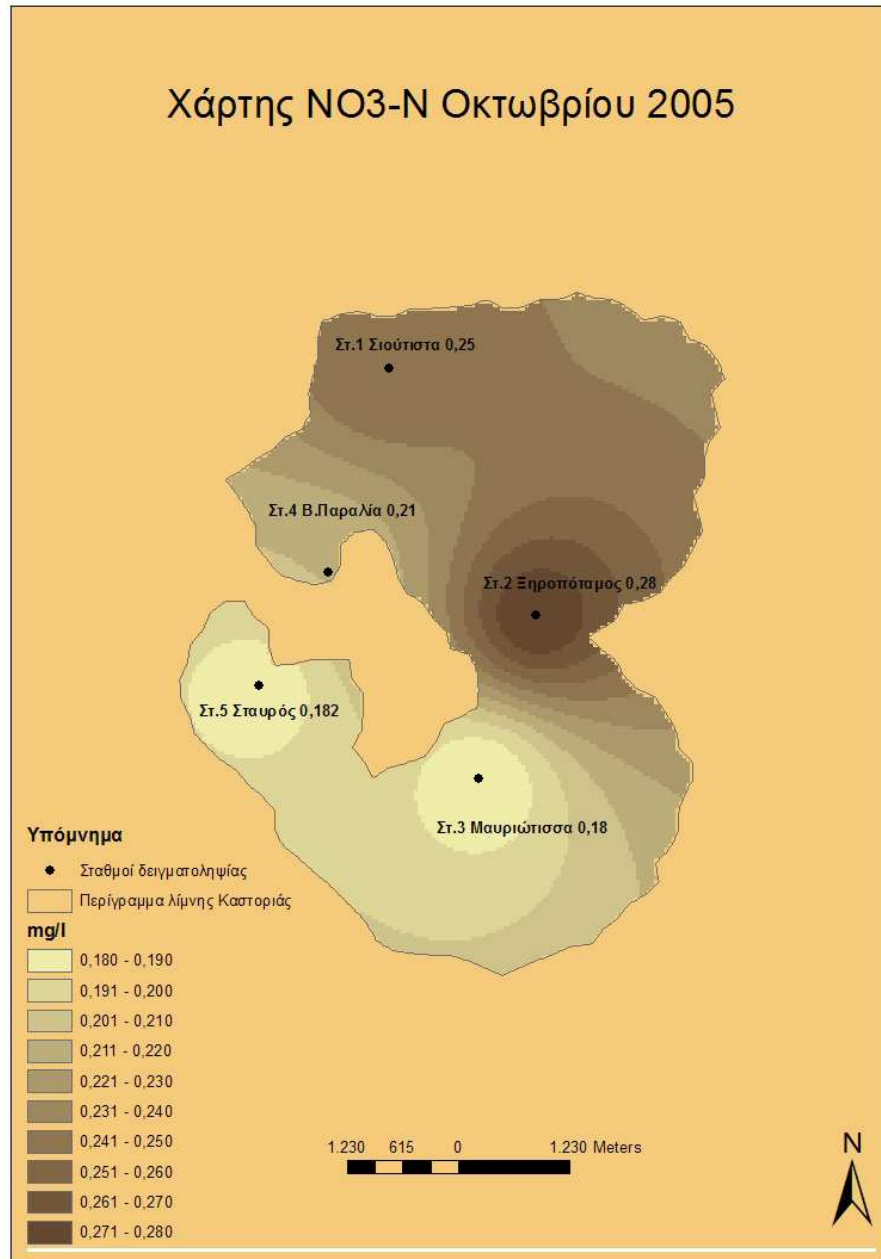
Εικόνα 64 Χάρτης Οξυγόνου επιφάνειας για τον μήνα Οκτώβριο του 2005 με την μέθοδο Splines.



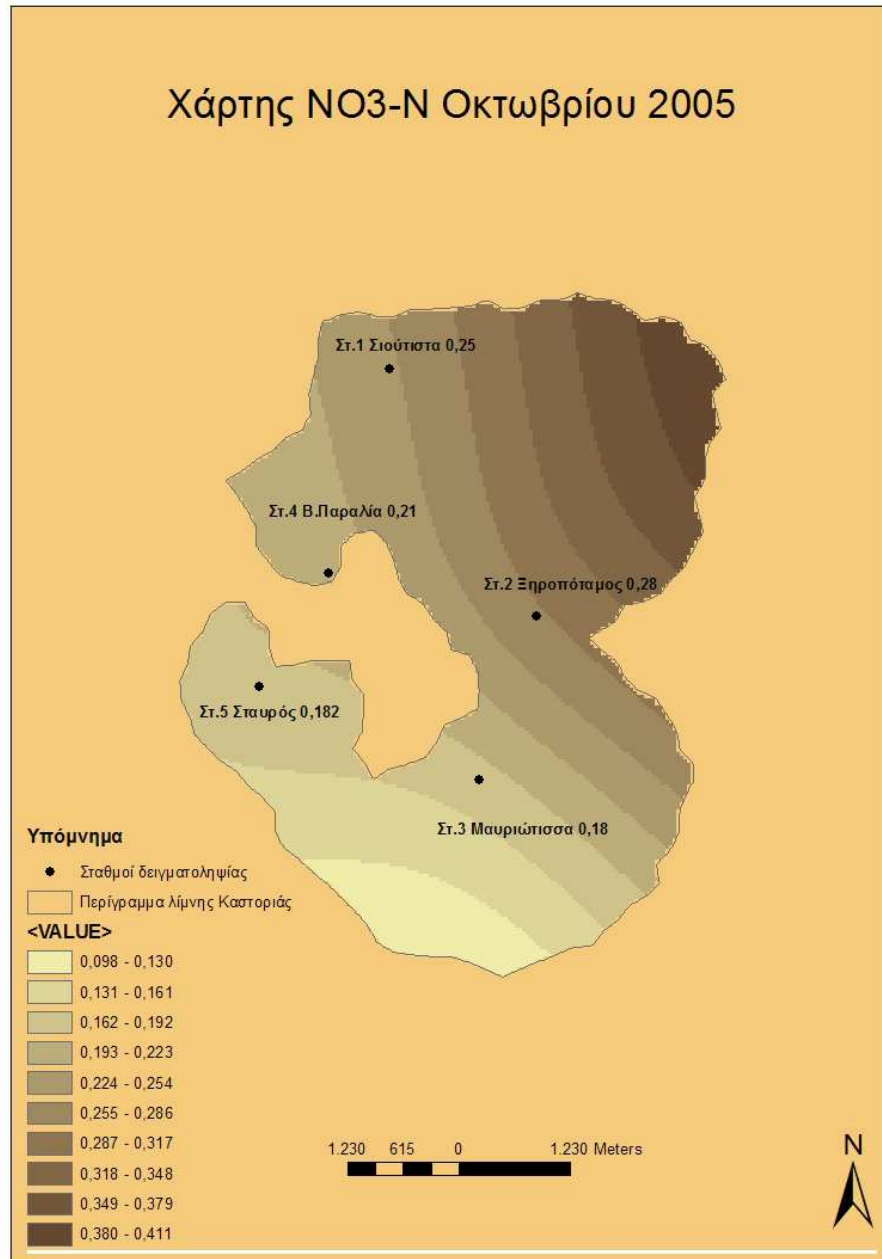
Εικόνα 65 Χάρτης NH₄-N επιφάνειας για τον μήνα Οκτώβριο του 2005 με την μέθοδο IDW.



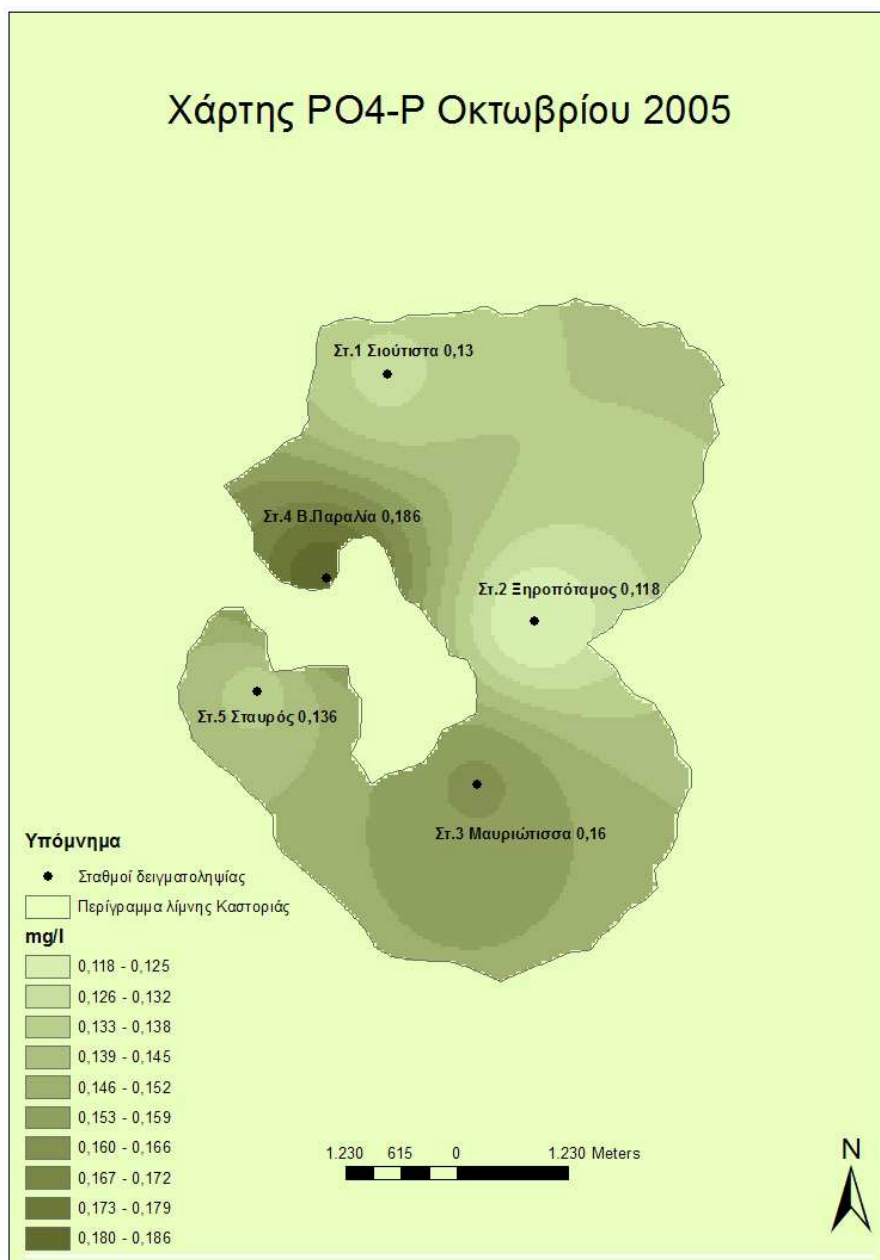
Εικόνα 66 Χάρτης NH₄-N επιφάνειας για τον μήνα Οκτώβριο του 2005 με την μέθοδο Splines.



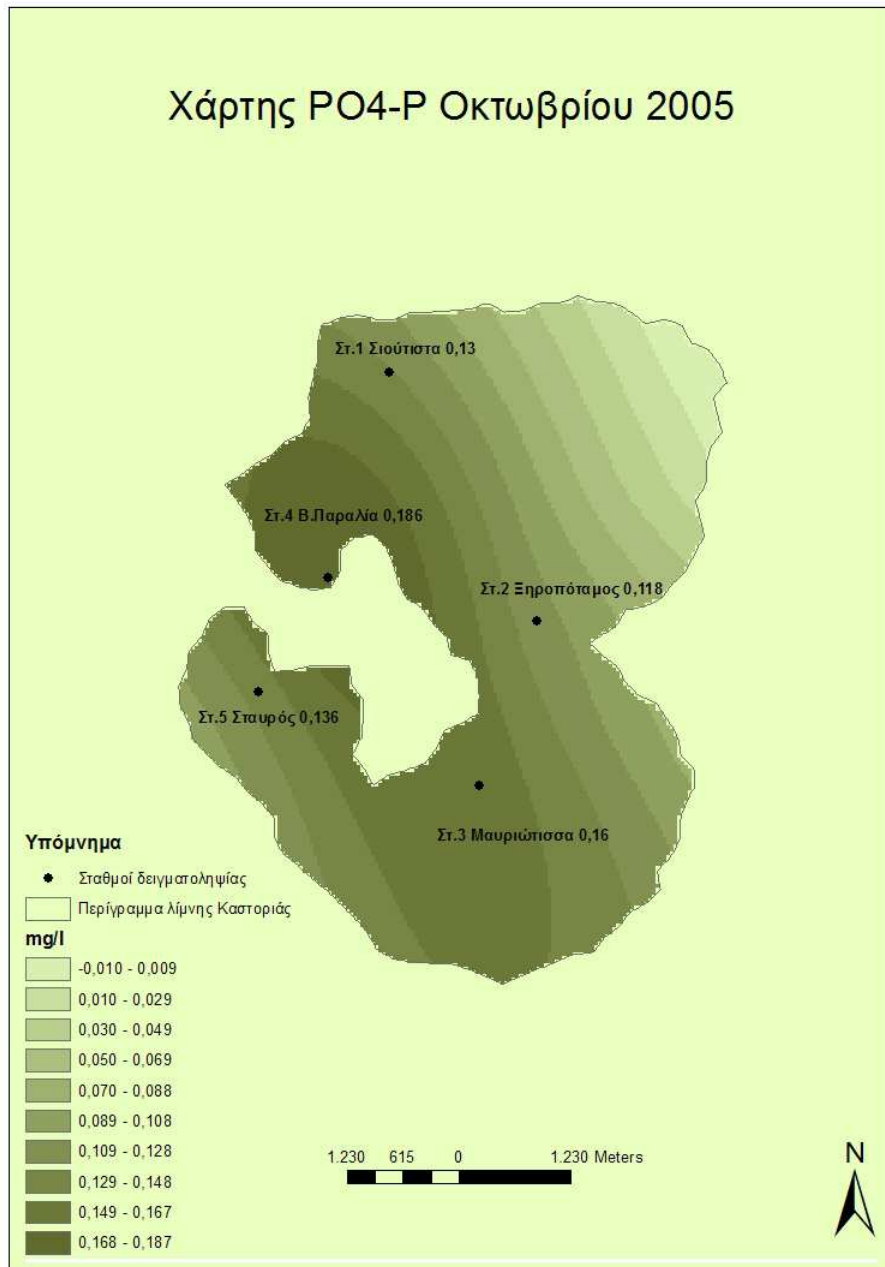
Εικόνα 67 Χάρτης NO₃-N επιφάνειας για τον μήνα Οκτώβριο του 2005 με την μέθοδο IDW.



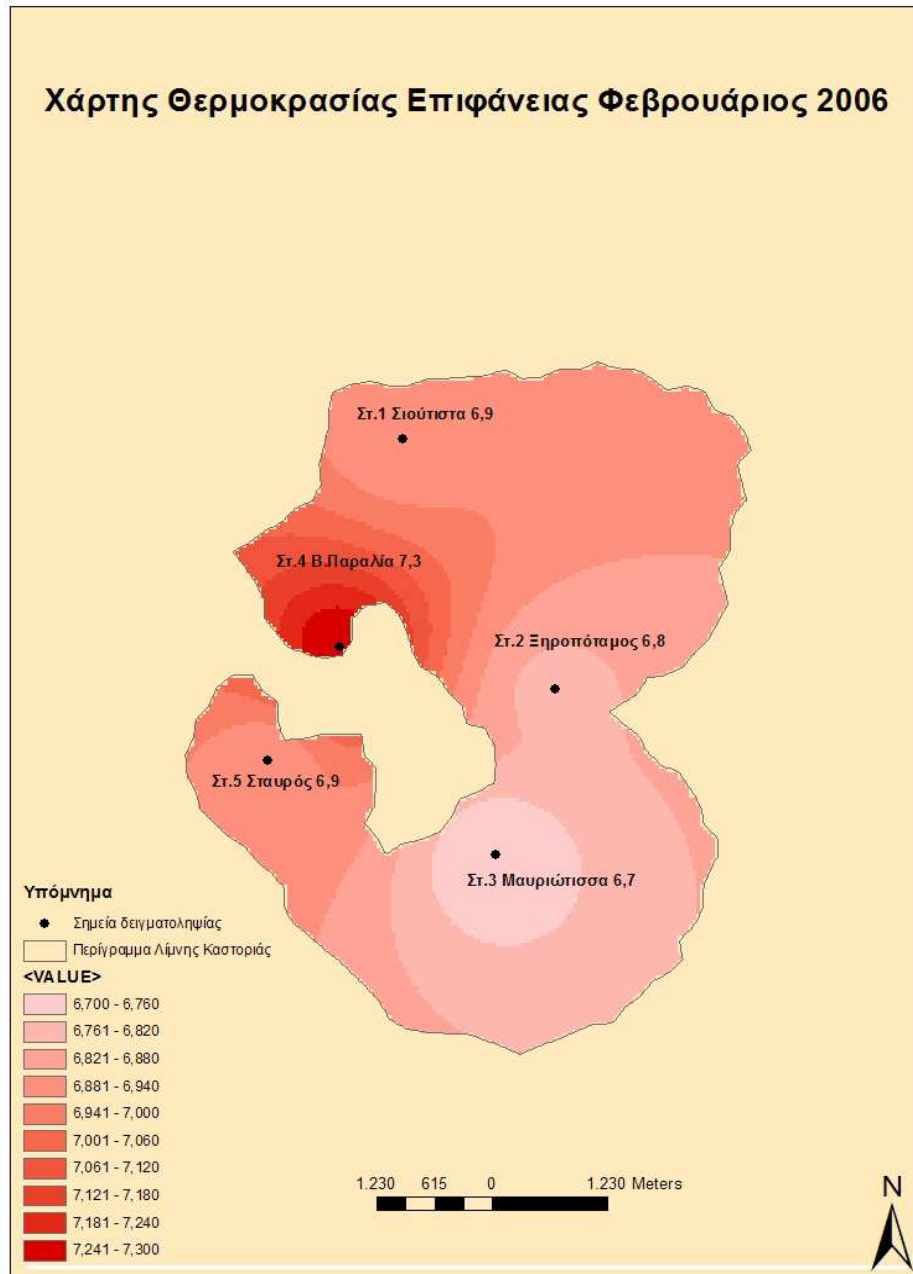
Εικόνα 68 Χάρτης NO₃-N επιφάνειας για τον μήνα Οκτώβριο του 2005 με την μέθοδο Splines.



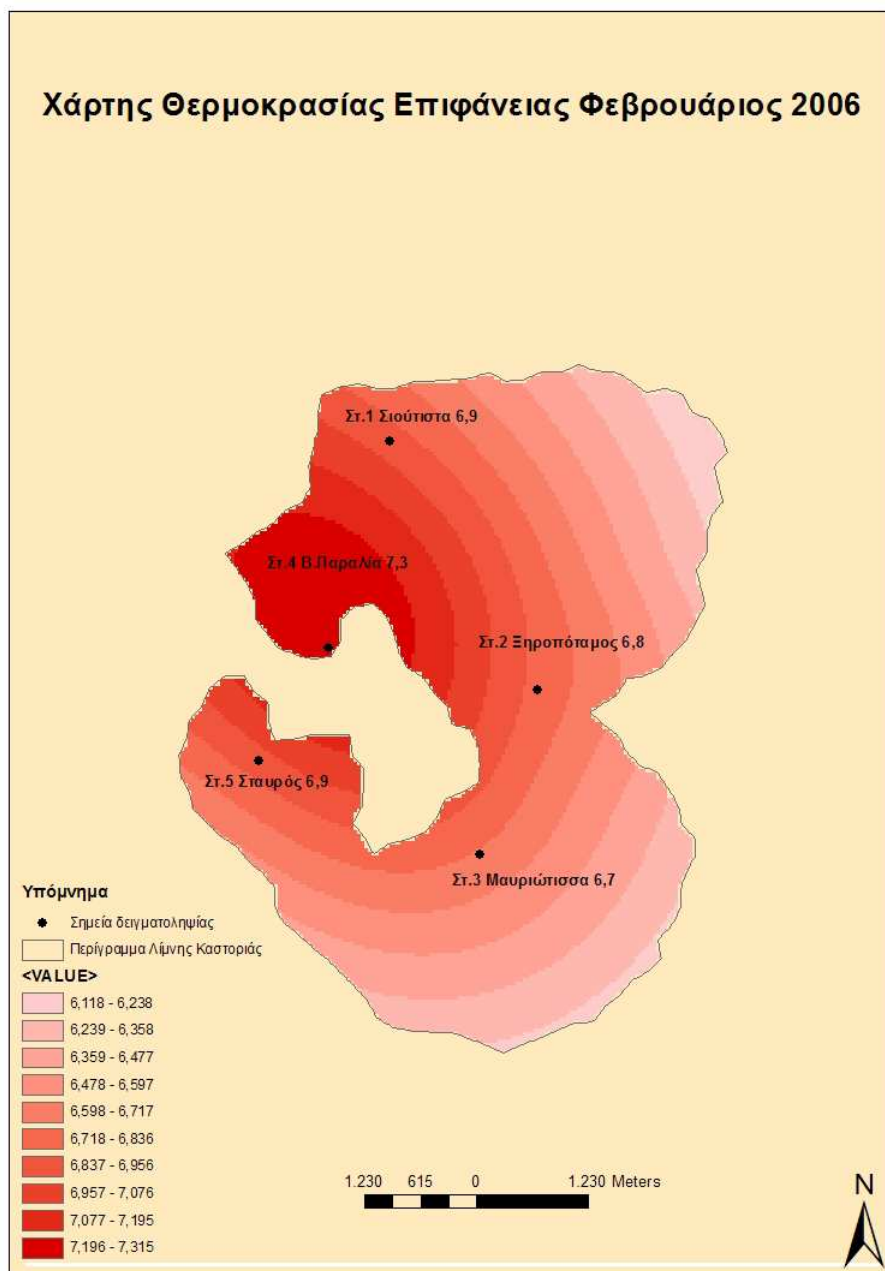
Εικόνα 69 Χάρτης PO₄-P επιφάνειας για τον μήνα Οκτώβριο του 2005 με την μέθοδο IDW.



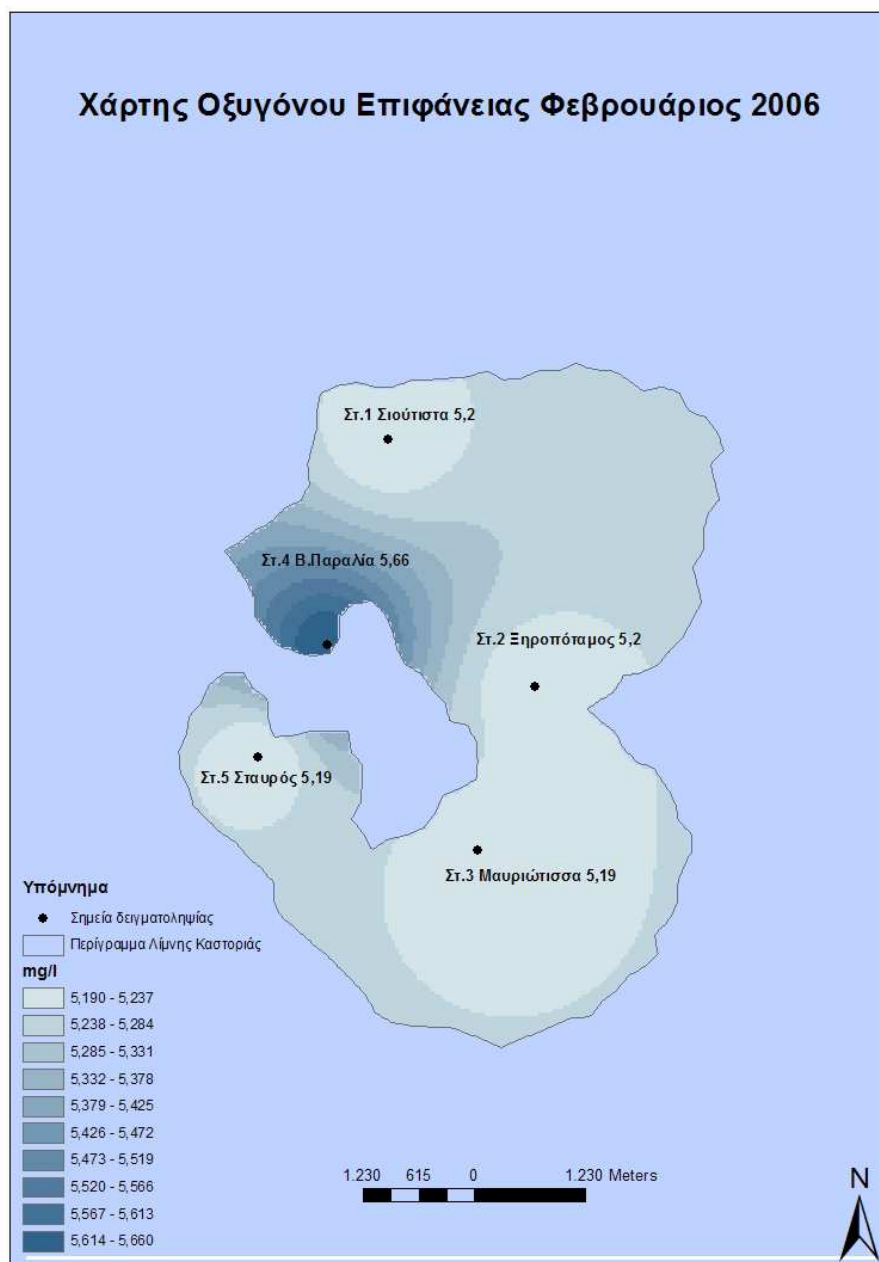
Εικόνα 70 Χάρτης PO₄-P επιφάνειας για τον μήνα Οκτώβριο του 2005 με την μέθοδο Splines.



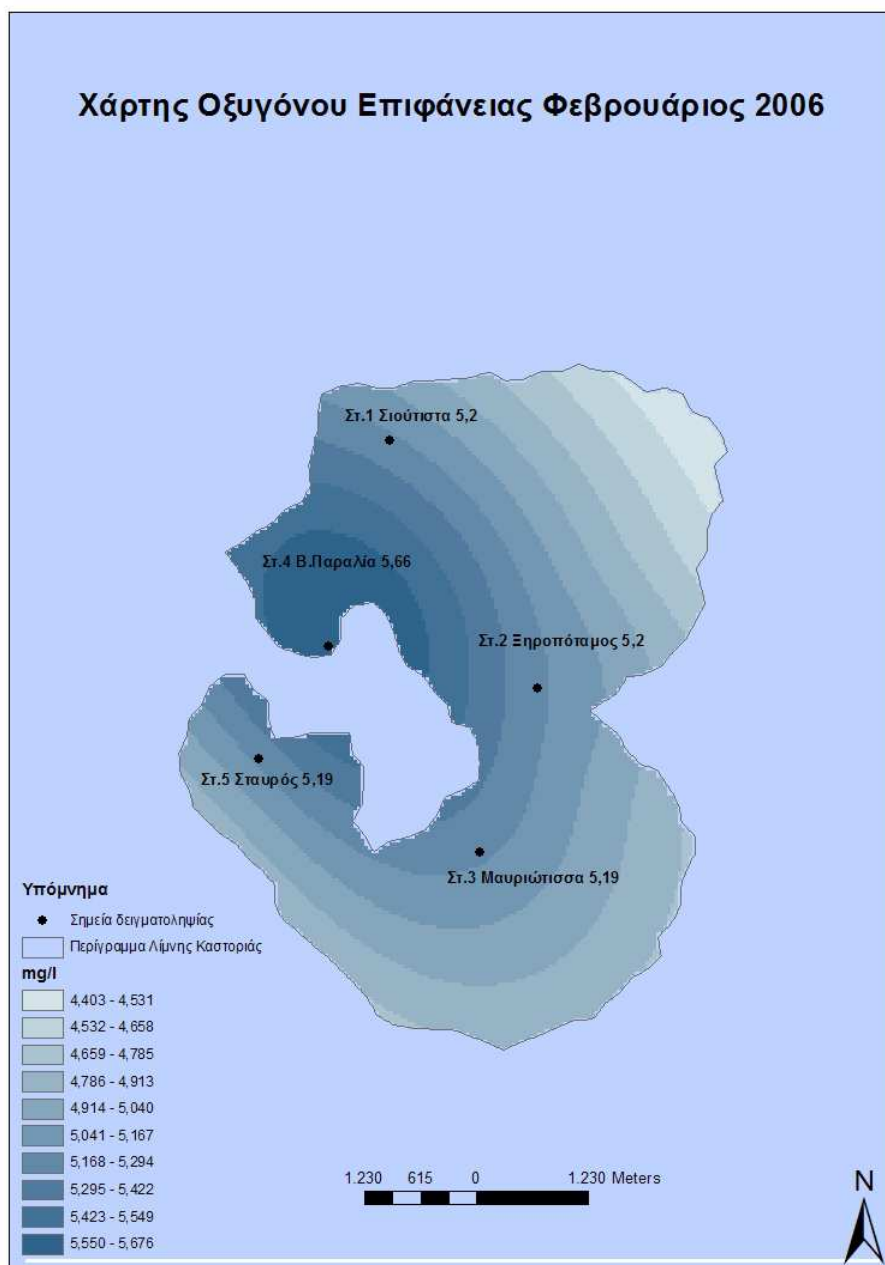
Εικόνα 71. Χάρτης Θερμοκρασίας επιφάνειας για τον Φεβρουάριο του 2006 με την μέθοδο IDW.



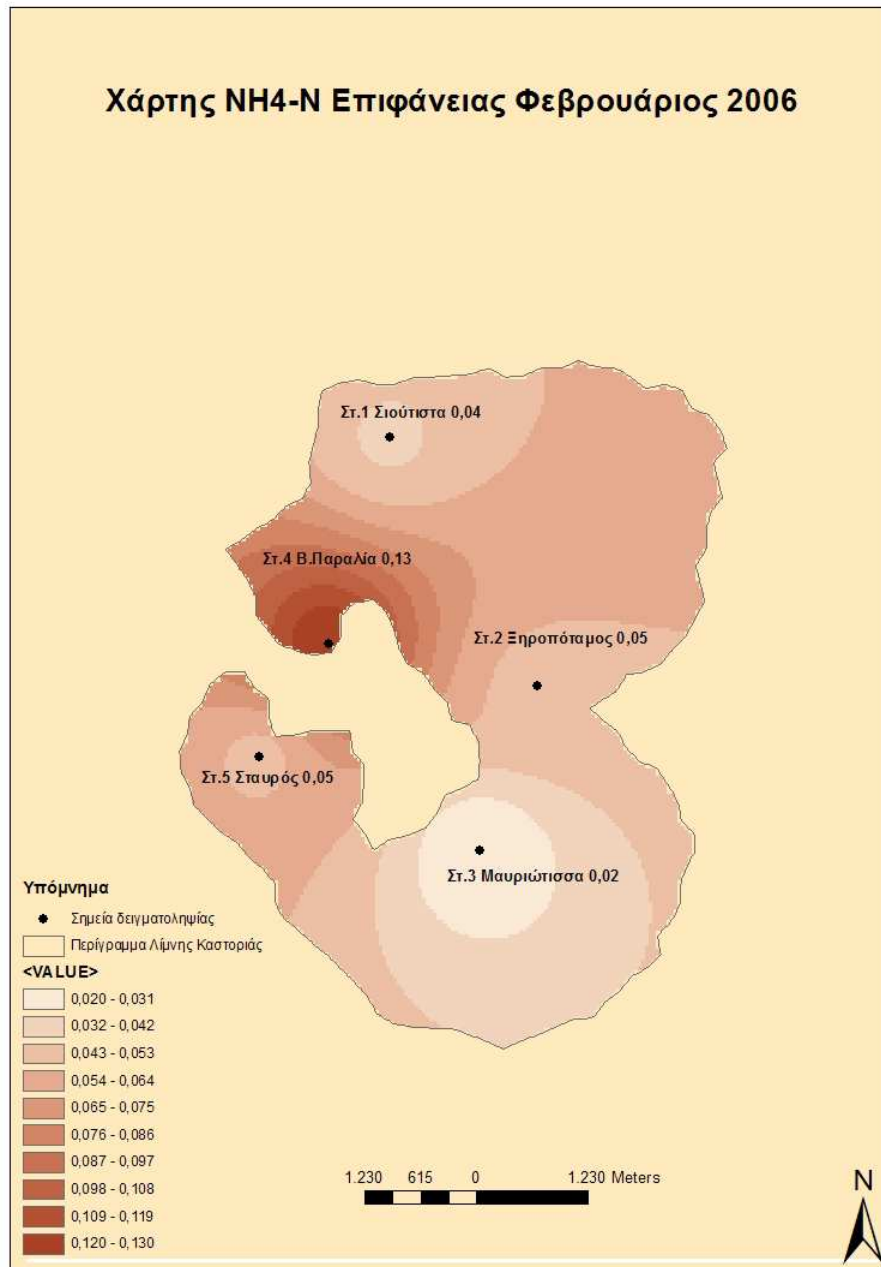
Εικόνα 72. Χάρτης Θερμοκρασίας επιφάνειας για τον Φεβρουάριο του 2006 με την μέθοδο Splines.



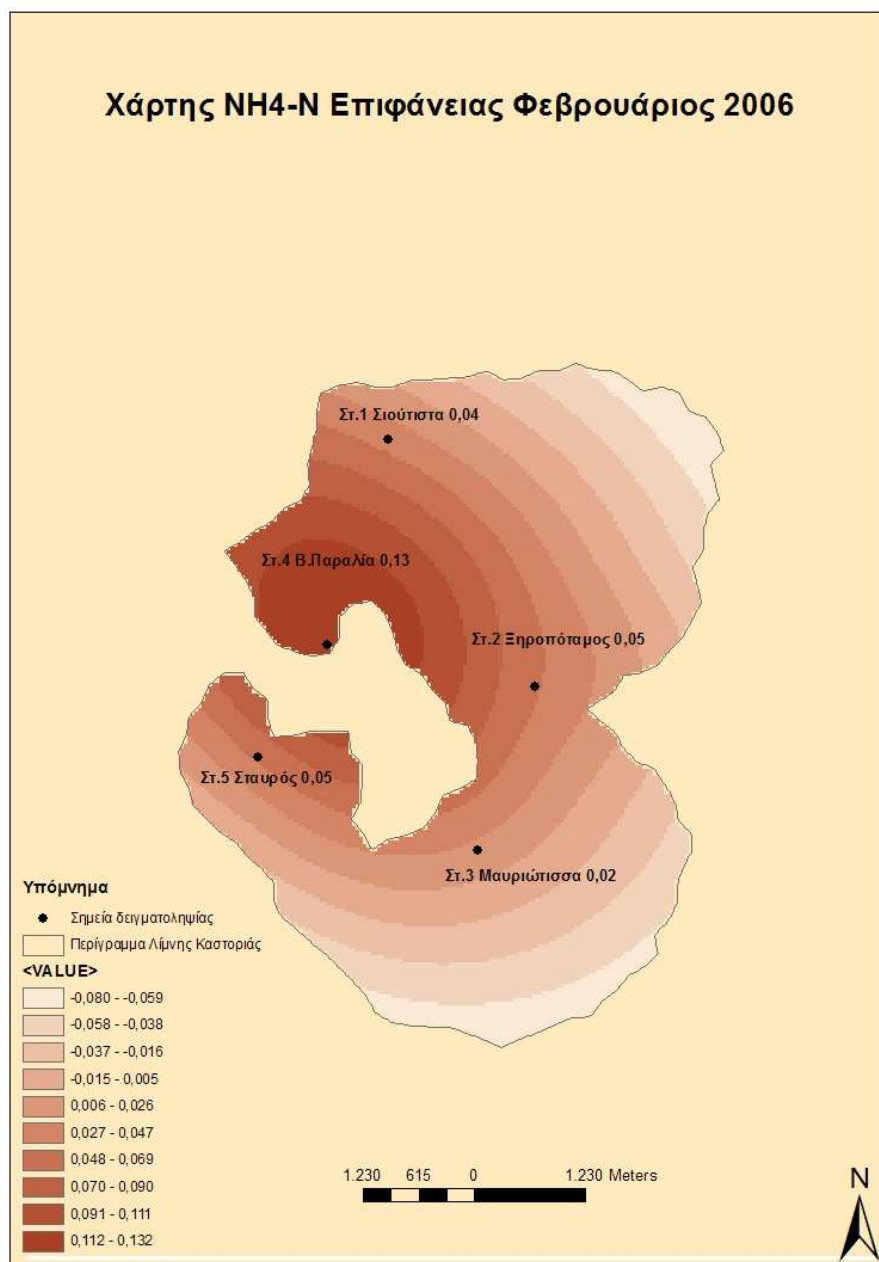
Εικόνα 73. Χάρτης διαλυμένου Οξυγόνου επιφάνειας για τον Φεβρουάριο του 2006 με την μέθοδο IDW.



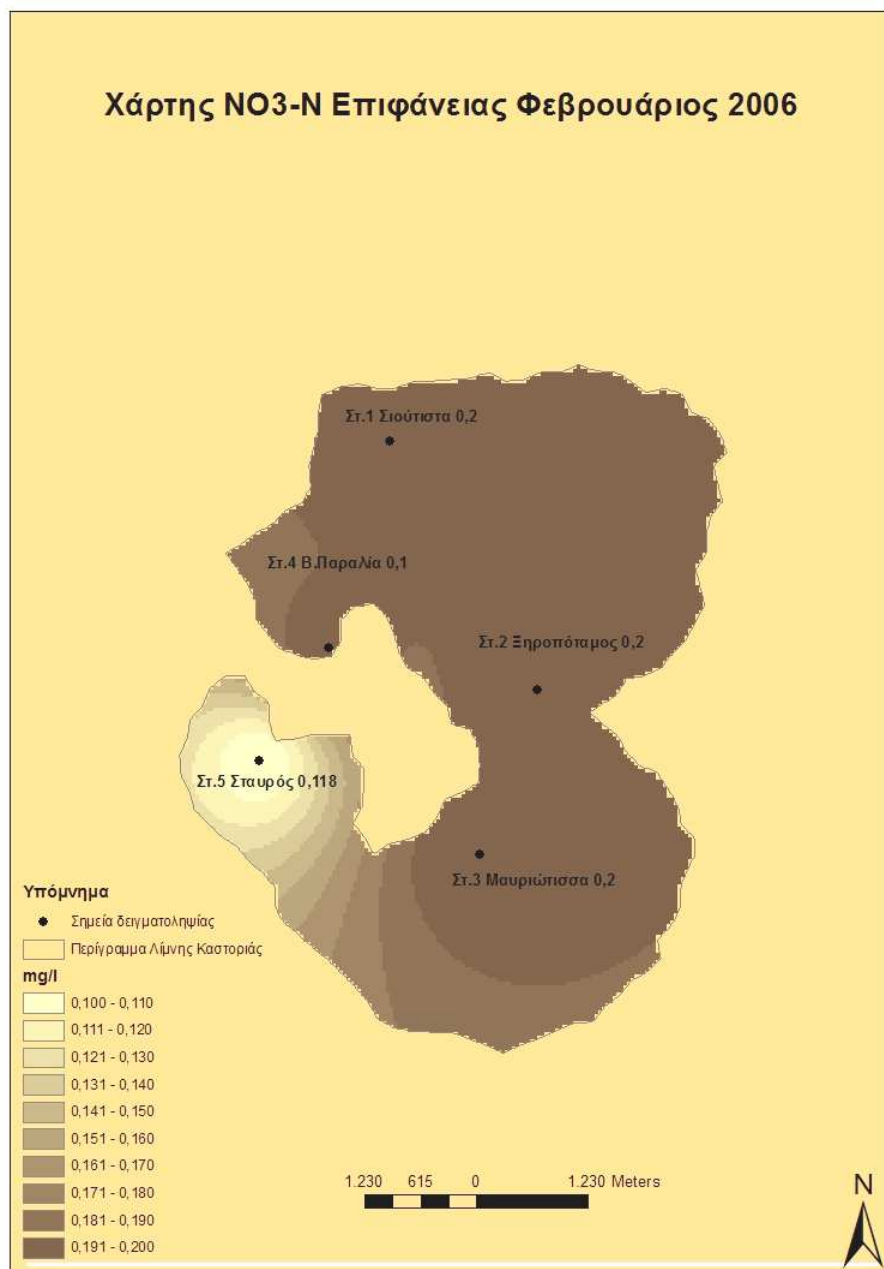
Εικόνα 74. Χάρτης διαλυμένου Οξυγόνου επιφάνειας για τον Φεβρουάριο του 2006 με την μέθοδο Splines.



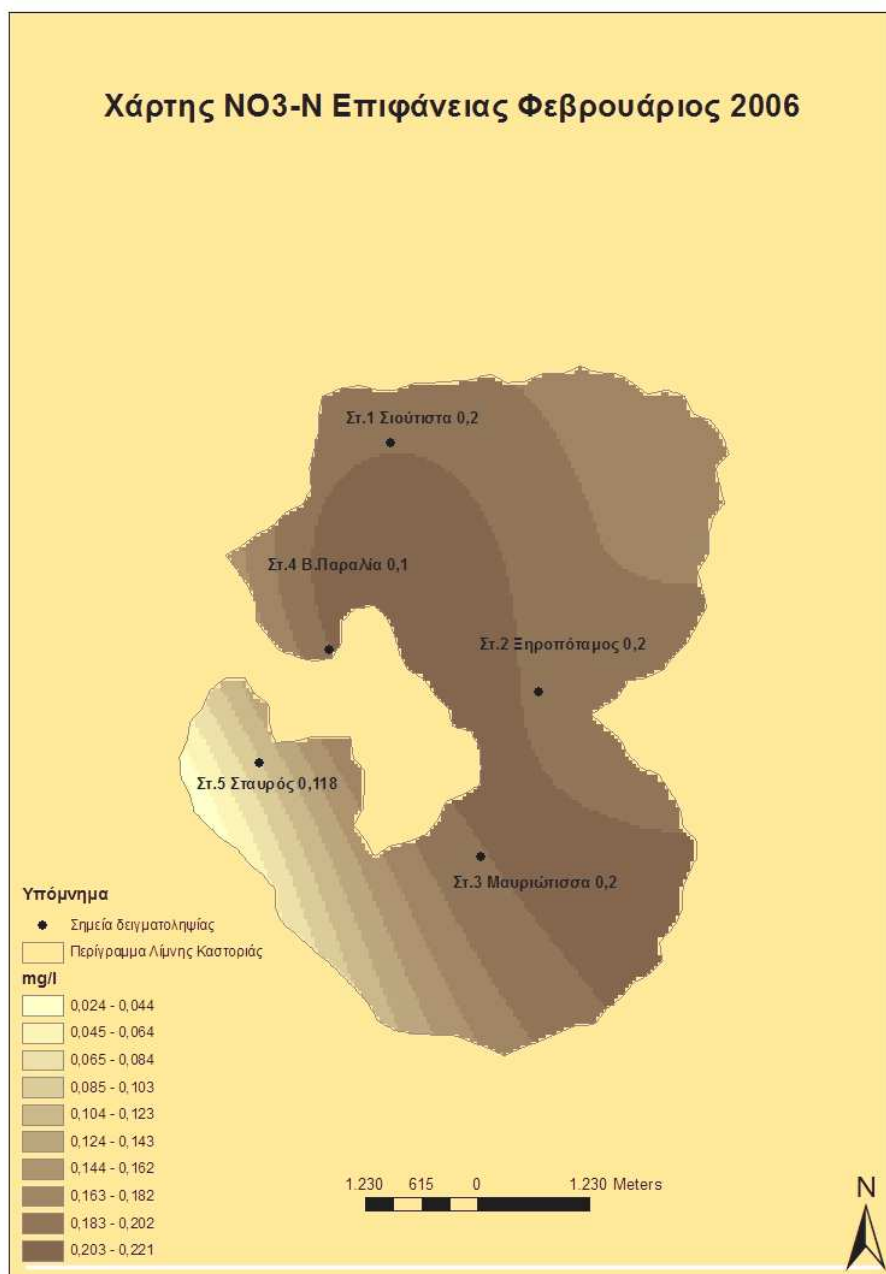
Εικόνα 75. Χάρτης NH₄-N επιφάνειας για τον Φεβρουάριο του 2006 με την μέθοδο IDW.



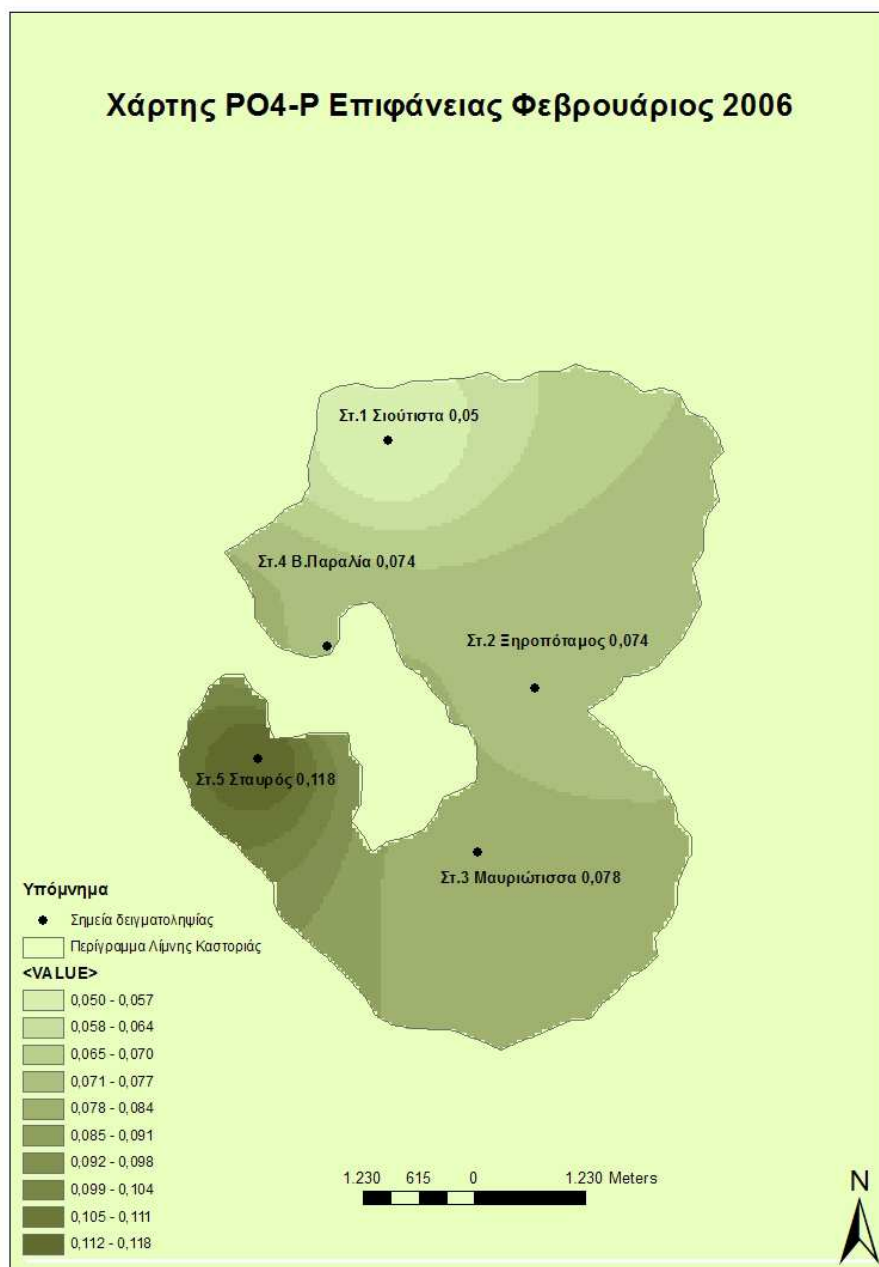
Εικόνα 76. Χάρτης NH₄-N επιφάνειας για τον Φεβρουάριο του 2006 με την μέθοδο Splines.



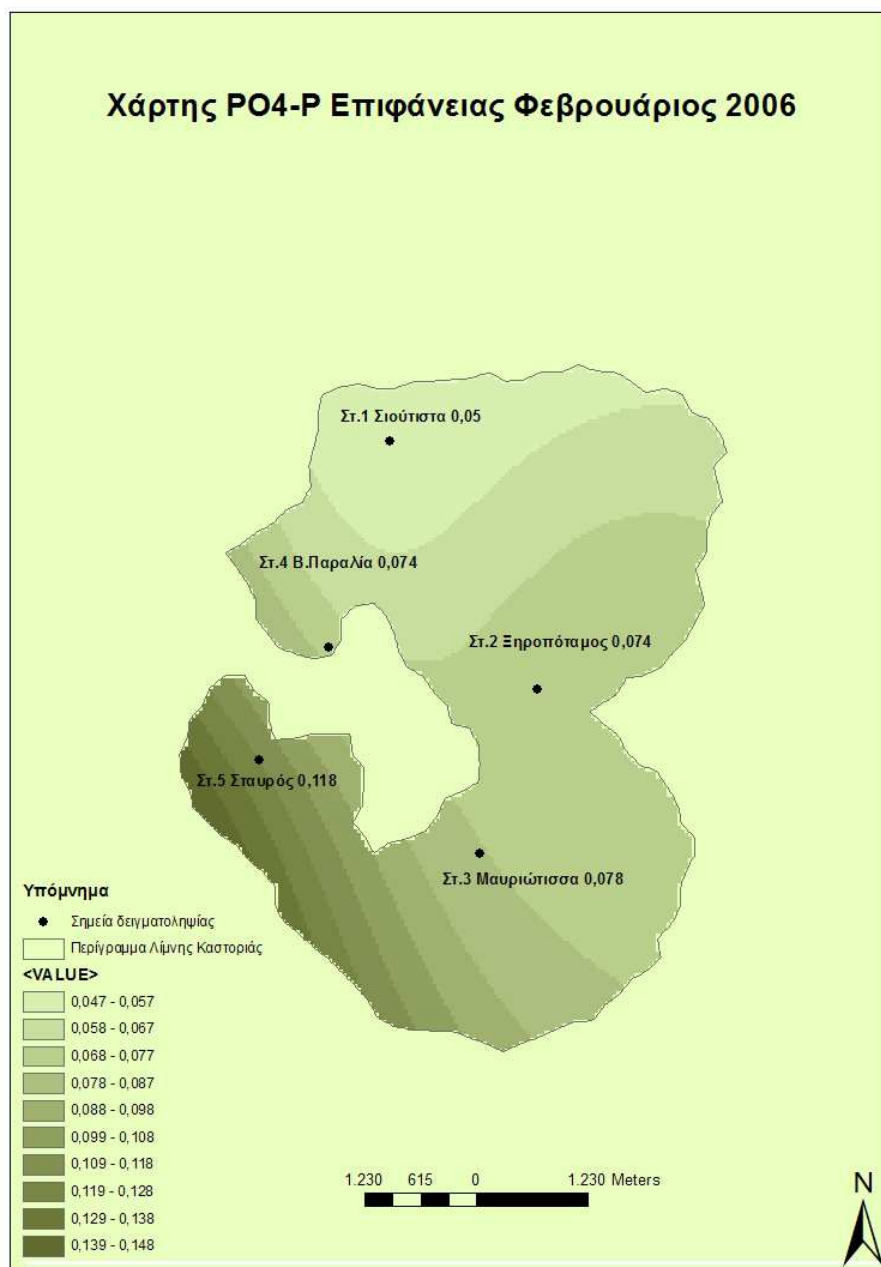
Εικόνα 77. Χάρτης NO₃-N επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2006 με την μέθοδο IDW.



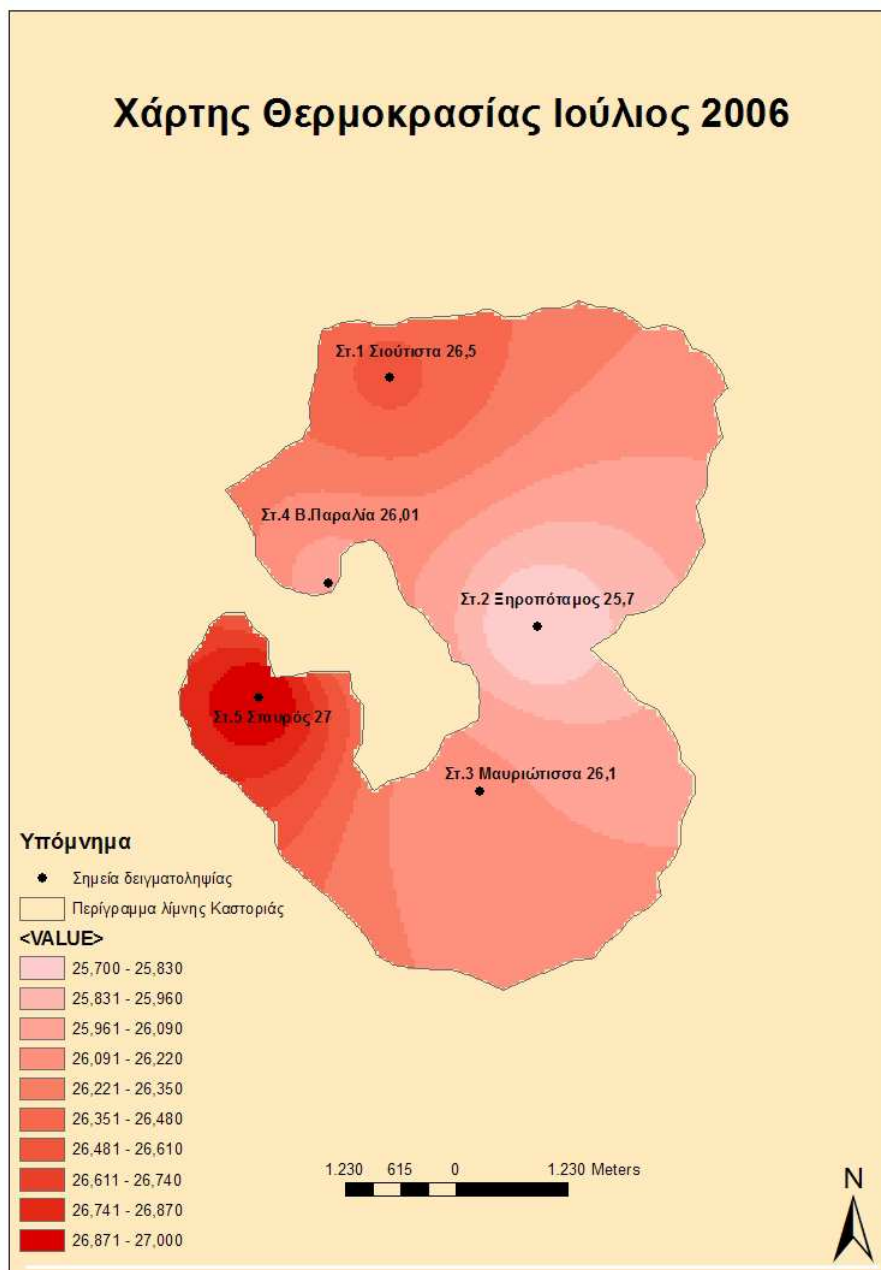
Εικόνα 78 Χάρτης NO₃-N επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2006 με την μέθοδο Splines.



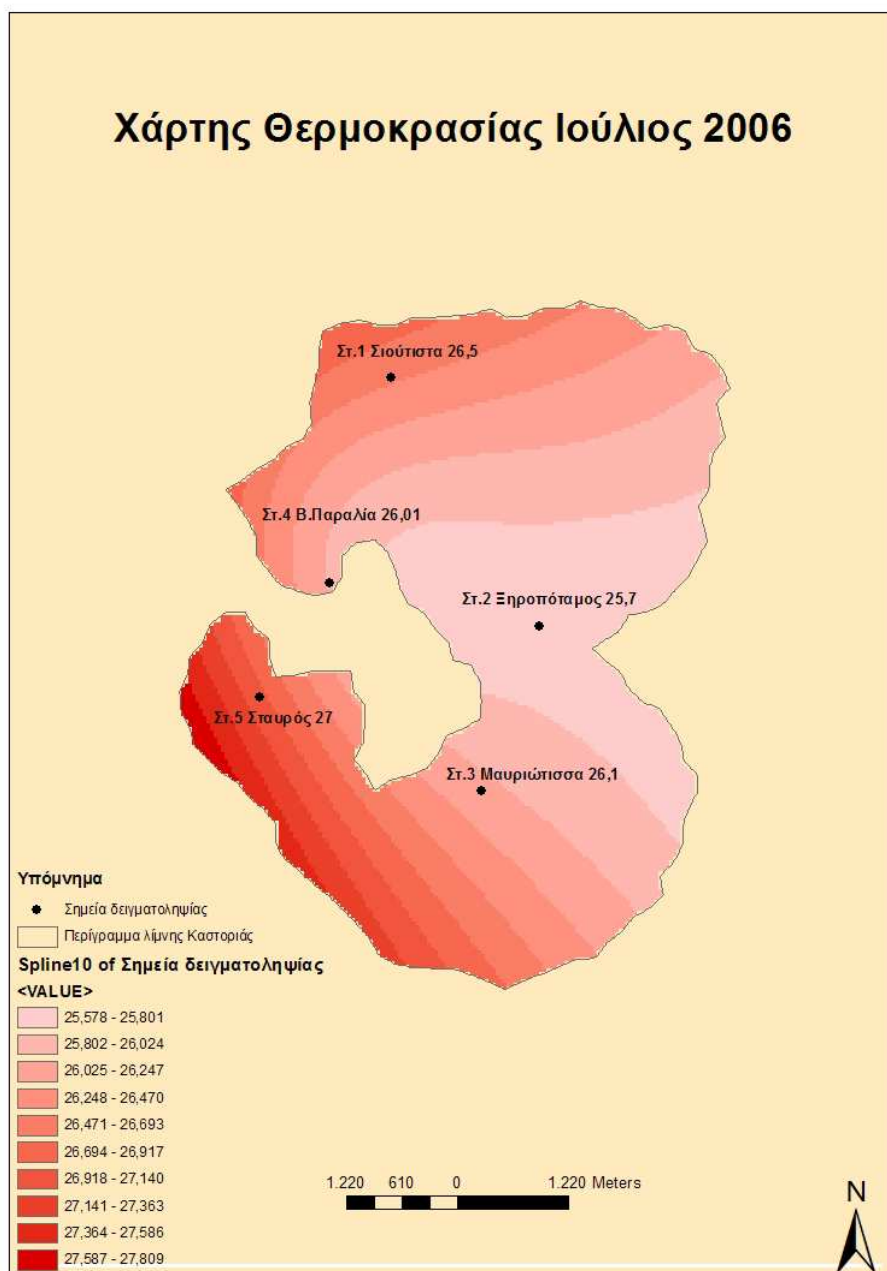
Εικόνα 79 Χάρτης PO₄-P επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2006 με την μέθοδο IDW.



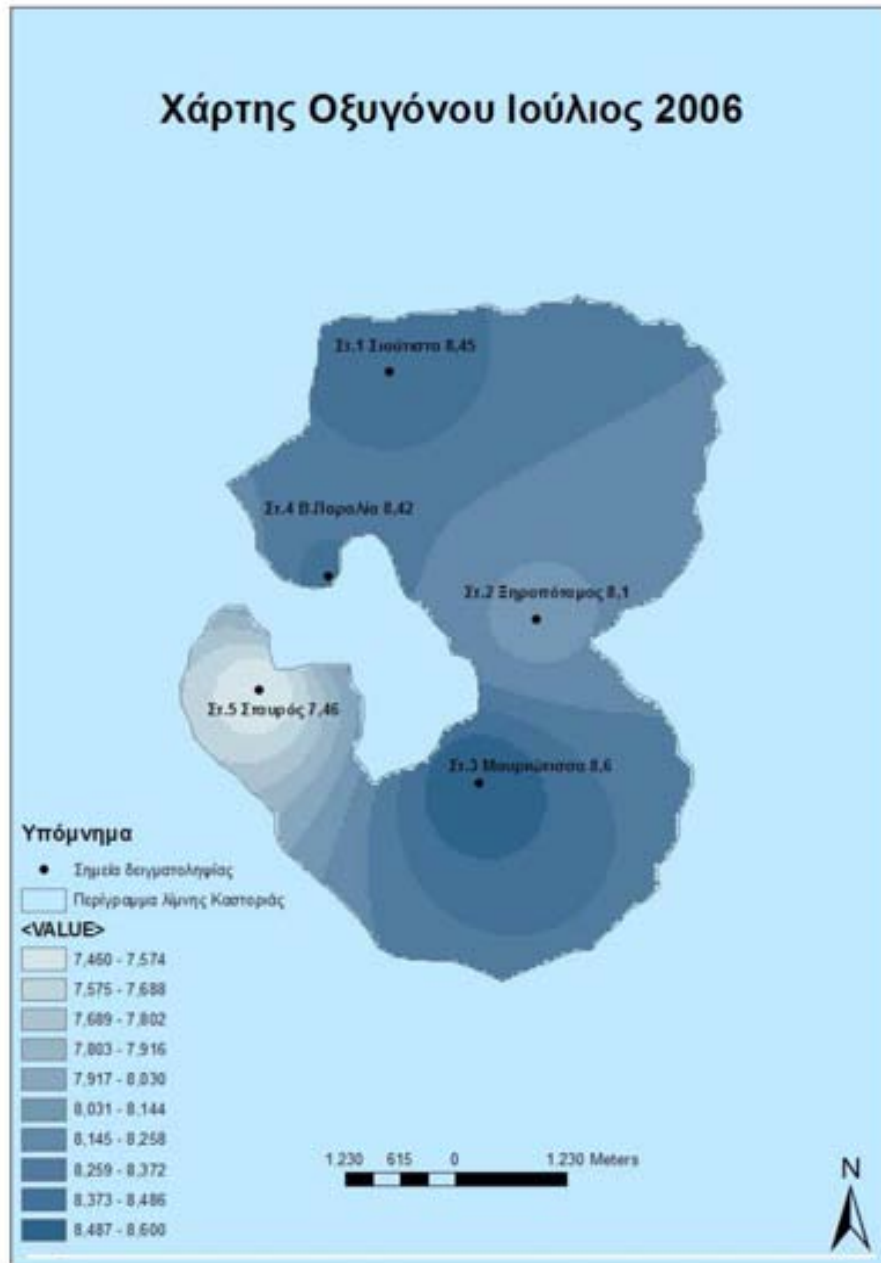
Εικόνα 80 Χάρτης PO₄-P επιφάνειας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2006 με την μέθοδο SPLINES.



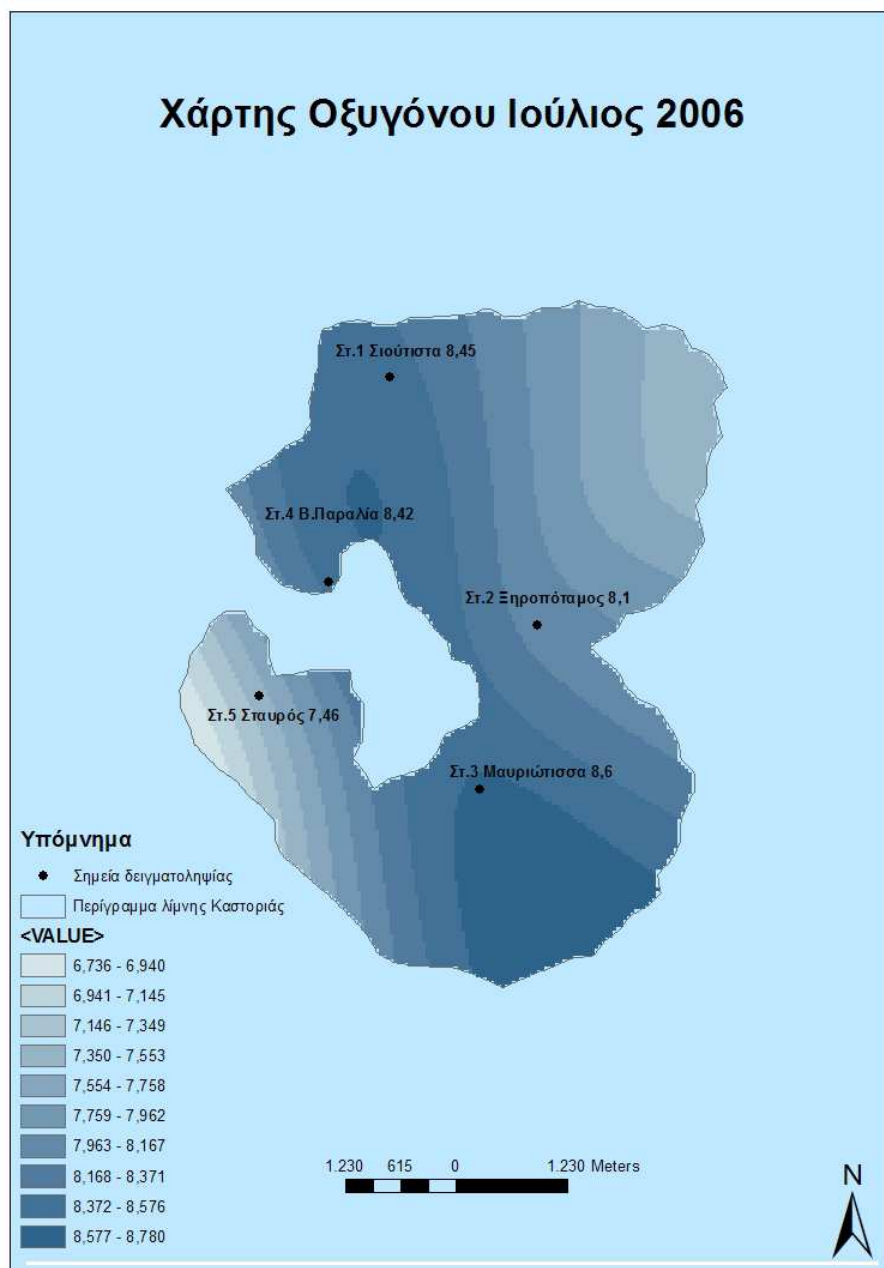
Εικόνα 81 Χάρτης Θερμοκρασίας επιφάνειας μηνός Ιουλίου του 2006 με την μέθοδο IDW.



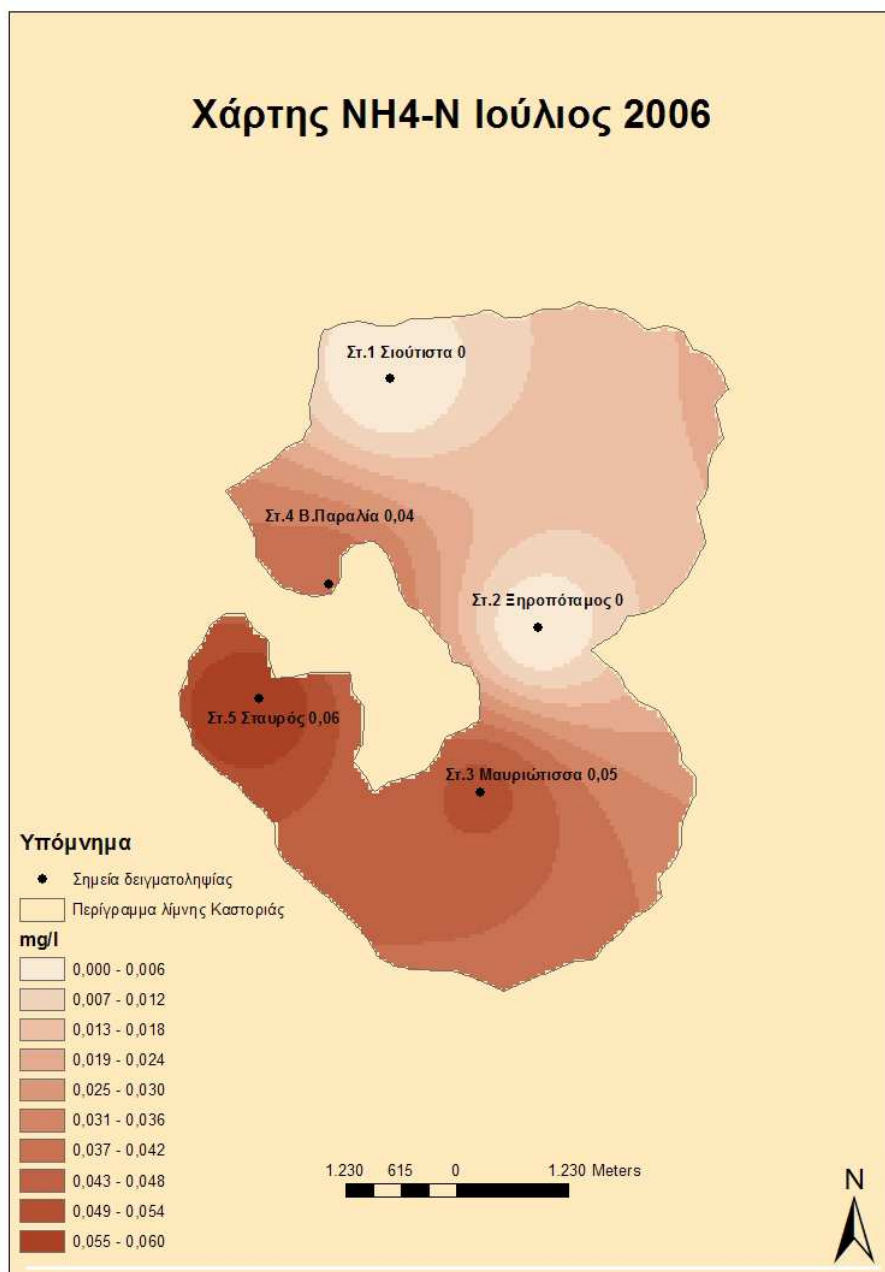
Εικόνα 82 Χάρτης Θερμοκρασίας επιφάνειας μηνός Ιουλίου του 2006 με την μέθοδο Splines.



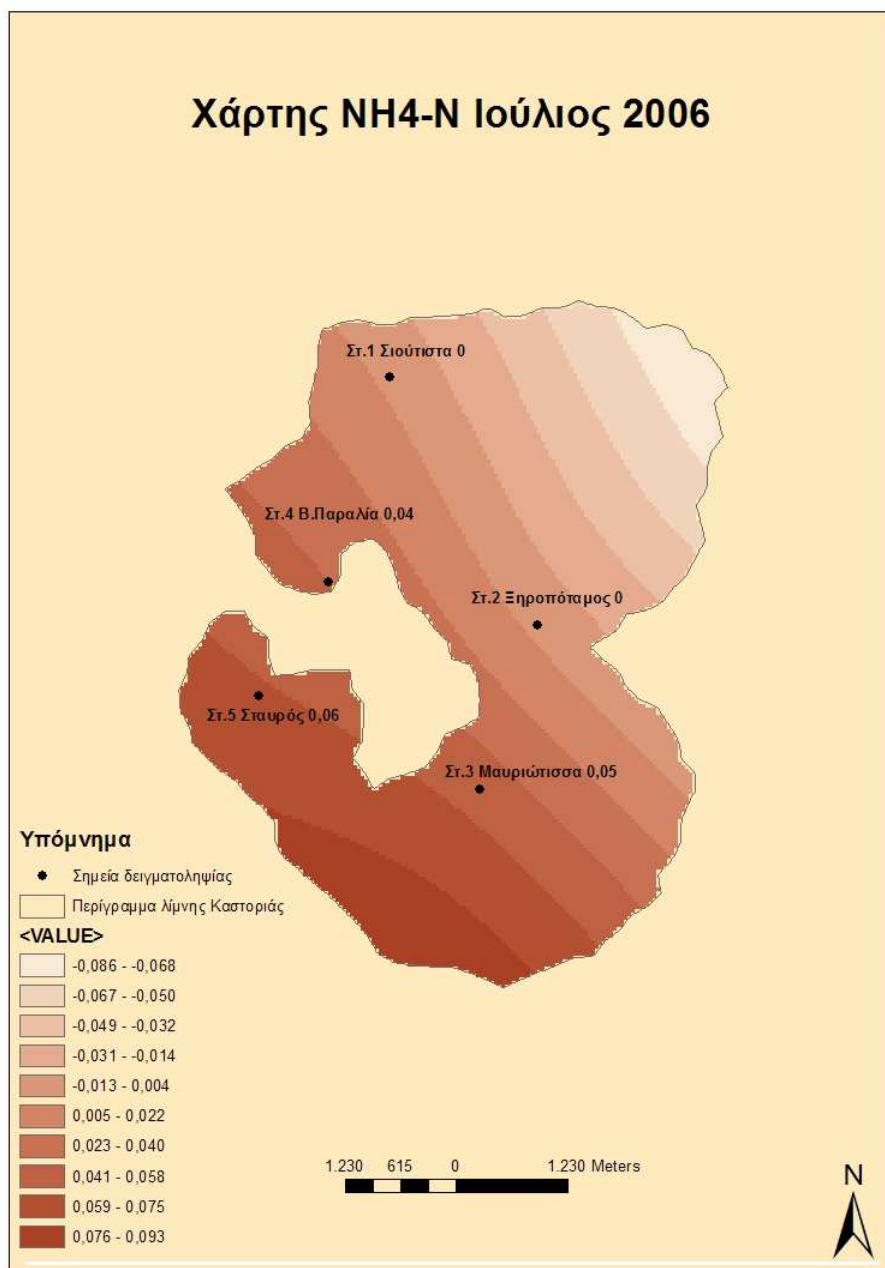
Εικόνα 83 Χάρτης διαλυμένου οξυγόνου επιφάνειας μηνός Ιουλίου του 2006 με την μέθοδο IDW.



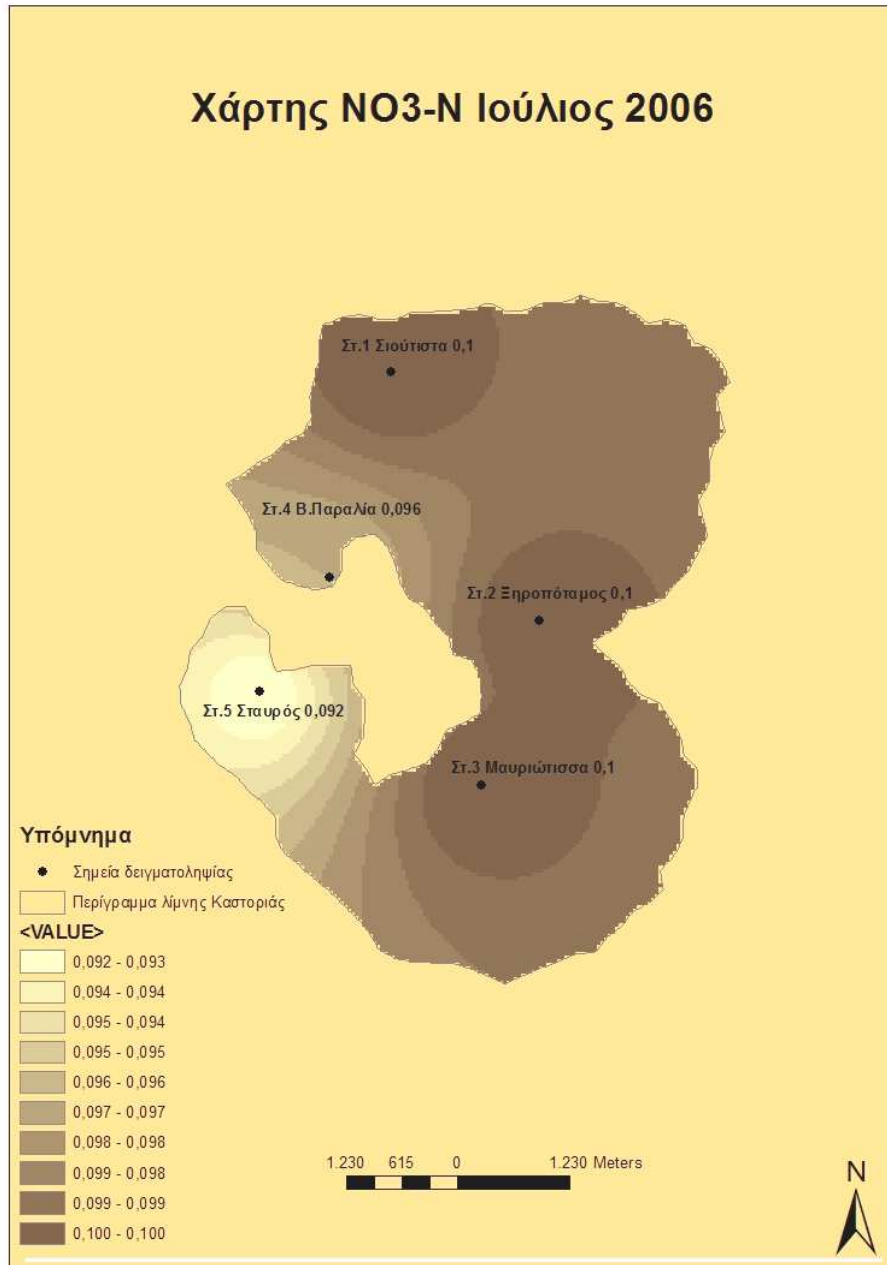
Εικόνα 84 Χάρτης διαλυμένου οξυγόνου επιφάνειας μηνός Ιουλίου του 2006 με την μέθοδο splines.



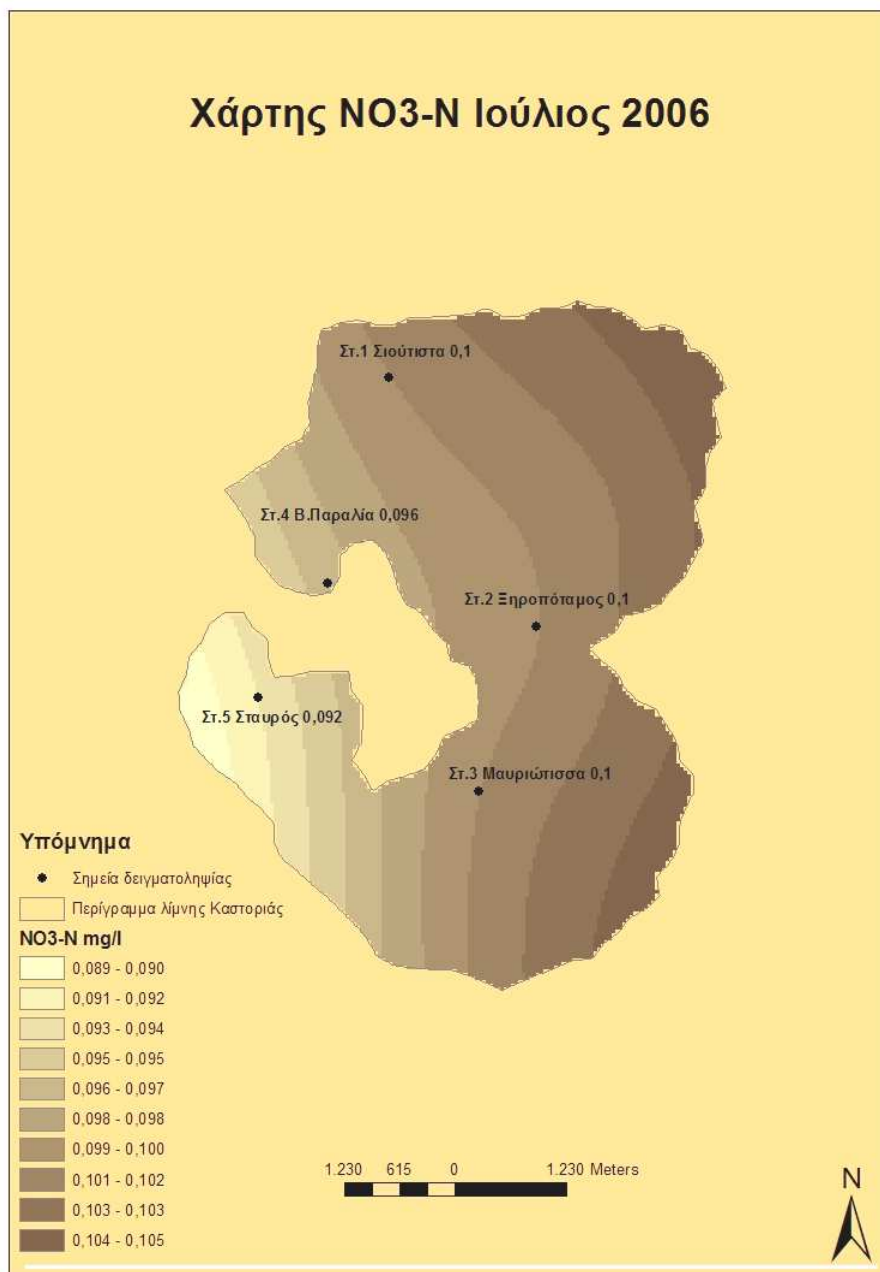
Εικόνα 85 Χάρτης NH₄-N επιφάνειας μηνός Ιουλίου του 2006 με την μέθοδο IDW.



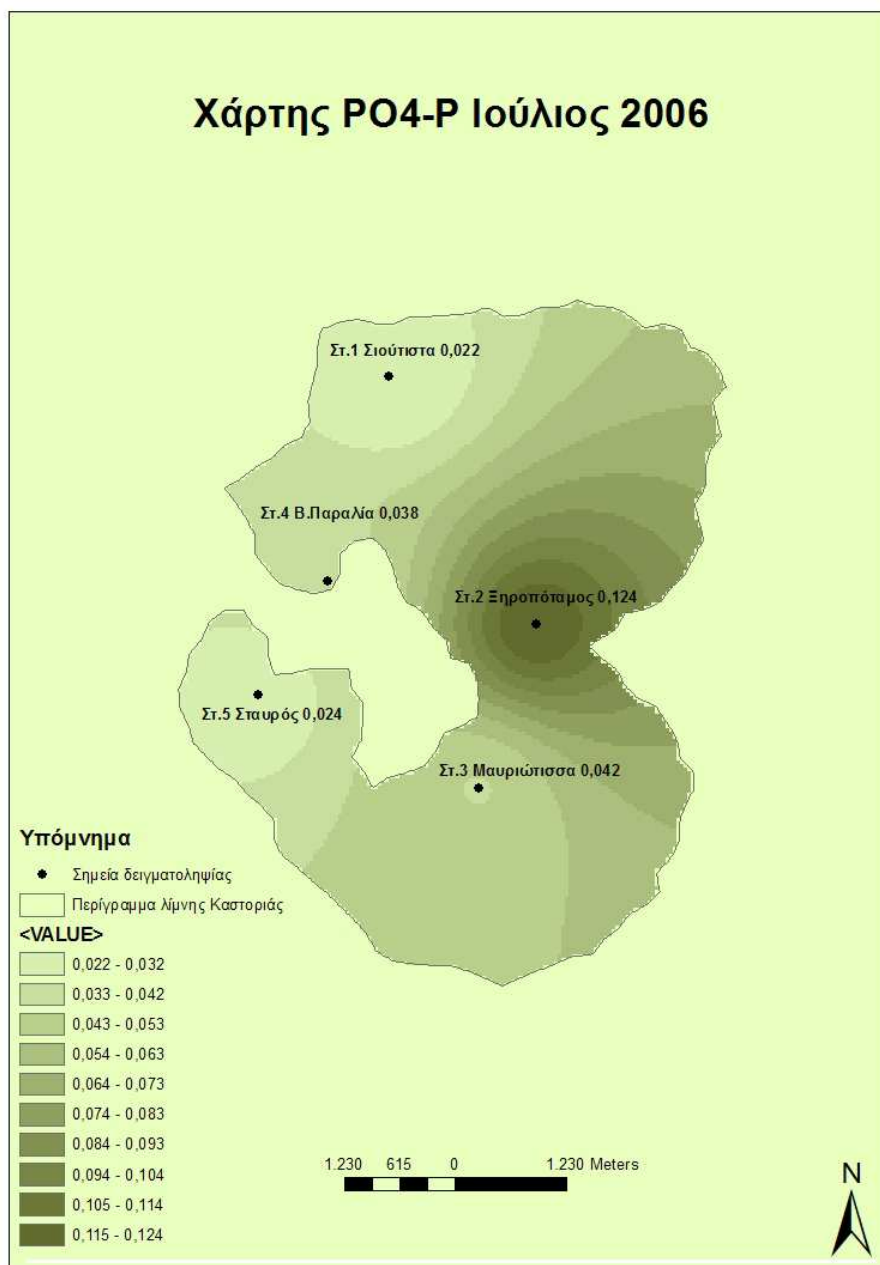
Εικόνα 86 Χάρτης NH₄-N επιφάνειας μηνός Ιουλίου του 2006 με την μέθοδο splines.



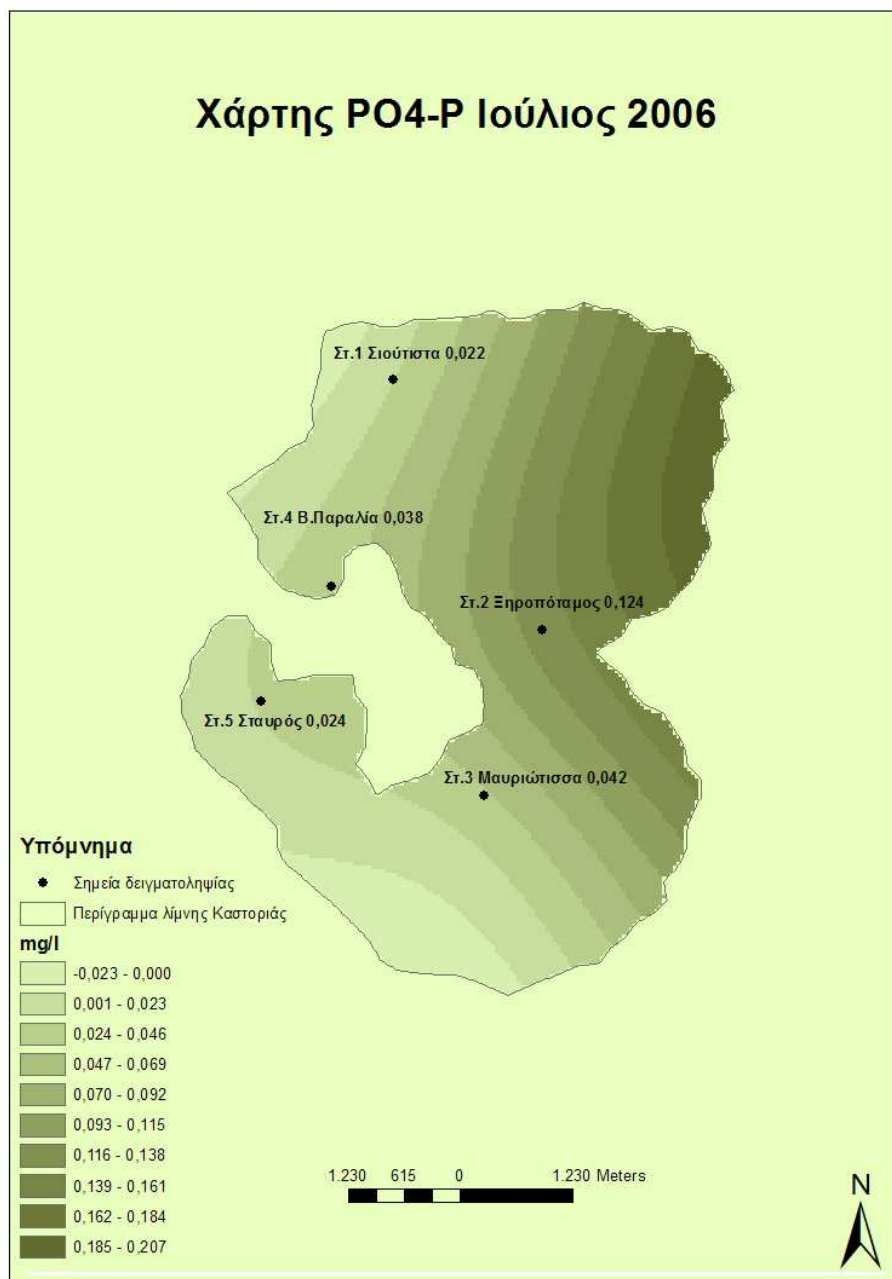
Εικόνα 87 Χάρτης NO₃-N επιφάνειας μηνός Ιουλίου του 2006 με την μέθοδο IDW.



Εικόνα 88 Χάρτης NO₃-N επιφάνειας μηνός Ιουλίου του 2006 με την μέθοδο splines.



Εικόνα 89 Χάρτης PO4-P επιφάνειας μηνός Ιουλίου του 2006 με την μέθοδο IDW.



Εικόνα 90 Χάρτης PO₄-P επιφάνειας μηνός Ιουλίου του 2006 με την μέθοδο Splines.

Μελετώντας τους παραπάνω χάρτες καταλήγουμε στα εξής:

Α) Αποτελέσματα για το μήνα Φεβρουάριο

- Τον Φεβρουάριο του 2005 σημειώθηκαν χαμηλότερες θερμοκρασίες (χάρτες 41,42) από ότι τον Φεβρουάριο του 2006 (χάρτες 71,72). Η χαμηλότερη θερμοκρασία παρατηρήθηκε τον Φεβρουάριο του 2005 στο Σταθμό 3 ($3,4^{\circ}\text{C}$) ενώ η υψηλότερη ήταν $7,3^{\circ}\text{C}$ στο Σταθμό 4.
- Οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου τον Φεβρουάριο του 2005 κυμάνθηκαν από 10,35-11,4 mg/l ενώ αντίστοιχα τον Φεβρουάριο του 2006 από 5,19-5,66 mg/l. Η υψηλότερη συγκέντρωση για τον Φεβρουάριο του 2005 σημειώθηκε στον σταθμό 1 (Χάρτες 43,44) και η χαμηλότερη συγκέντρωση για τον Φεβρουάριο του 2006 σημειώθηκε στο Σταθμό 5 (χάρτες 73,74). Οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου τον Φεβρουάριο του 2006 κυμάνθηκαν σε χαμηλά επίπεδα καθώς η λίμνη παρέμεινε παγωμένη για μεγάλο χρονικό διάστημα .
- Οι συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου τον Φεβρουάριο του 2006 κυμάνθηκαν από 0,02-0,13 mg/l (Χάρτες 75,76) ενώ τον Φεβρουάριο του 2005 κυμάνθηκαν από 0,02-0,05 mg/l (Χάρτες 45,46). Οι ελάχιστες συγκεντρώσεις 0,02 mg/l παρατηρήθηκαν τον Φεβρουάριο του 2005 στον Σταθμό 1 και το Φεβρουάριο του 2006 στον σταθμό 3. Οι τιμές κυμάνθηκαν περίπου στα ίδια επίπεδα. Η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρήθηκε στο Σταθμό 4 (B. Παραλία) όπου βρέθηκε ίση με 0,13 mg/l κατά τον Φεβρουάριο του 2006. Ο σταθμός της B.Παραλίας είναι κοντά σε κατοικημένη περιοχή και έτσι η αύξηση του αμμωνιακού αζώτου μπορεί να έχει προκληθεί από κάποια διαρροή αποβλήτων.

- Οι συγκεντρώσεις του νιτρικού αζώτου ήταν σημαντικά υψηλότερες κατά τον Φεβρουάριο του 2006 (Χάρτες 77,78) σε τέσσερις από τους πέντε σταθμούς, όπου έλαβαν την ίδια τιμή 0,2 mg/l και η ελάχιστη σημειώθηκε στο Σταθμό 5 0,1 mg/l. Ενώ τον Φεβρουάριο του 2005 οι τιμές κυμάνθηκαν από 0,013-0,04 mg/l. Η μέγιστη τιμή 0,04 σημειώθηκε στο Σταθμό 1, στη θέση Σιούτιστα. Οι βροχοπτώσεις ήταν εντονότερες τον Φεβρουάριο του 2006 με αποτέλεσμα ποσότητες νιτρικών να εισέλθουν στη λίμνη με τις εκπλύσεις των καλλιεργήσιμων εδαφών. Άλλωστε οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σημειώθηκαν στους σταθμούς που βρίσκονται κοντά σε ρέματα και καλλιεργήσιμες εκτάσεις.
- Οι συγκεντρώσεις των ορθοφωσφορικών κυμάνθηκαν σε υψηλότερες τιμές τον Φεβρουάριο του 2006 (Χάρτες 79,80) από 0,05mg/l στο Σταθμό 1 έως 0,118mg/l στον Σταθμό 5. Τον Φεβρουάριο του 2005 οι συγκεντρώσεις των ορθοφωσφορικών κυμάνθηκαν από 0,04 mg/l στον σταθμό 3 έως 0,06 mg/l στον σταθμό 1. Κατά τον ίδιο τρόπο δικαιολογείται η μεγαλύτερη συγκέντρωση ορθοφωσφορικών κατά τον Φεβρουάριο του 2006. Επίσης η μέγιστη συγκέντρωση αφορά τον Σταθμό 5 στη θέση Σταυρός που βρίσκεται σε κατοικημένη περιοχή στην νότια παραλία, όπου καταλήγουν αγωγοί ομβρίων, στους οποίους απορρέουν νερά που έχουν χρησιμοποιηθεί για την καθαριότητα εξωτερικών χώρων (εμπορικά καταστήματα, κέντρα ψυχαγωγίας κ.α.) και περιέχουν απορρυπαντικά πλούσια σε φώσφορο.

B) Αποτελέσματα για τον μήνα Ιούλιο

- Κατά του μήνες Ιούλιο του 2005 και Ιούλιο του 2006, οι θερμοκρασίες της επιφάνειας του νερού κυμάνθηκαν περίπου στις ίδιες υψηλές τιμές. Τον Ιούλιο

του 2005 από 25,7-26,8°C (Χάρτες 51,52) ενώ τον Ιούλιο του 2006 από 26,01 έως 27 °C (Χάρτες 81,82).

- Οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου μετρήθηκαν σε υψηλότερες τιμές τον Ιούλιο του 2005 από 8,5-9,78 mg/l (Χάρτες 53,54) ενώ τον Ιούλιο του 2006 κυμάνθηκαν από 7,46 έως 8,6.(Χάρτες 83,84). Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου δικαιολογούνται με την παραγωγή οξυγόνου κατά την διάρκεια της ημέρας εξαιτίας της φωτοσύνθεσης. Βέβαια οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου τον μήνα Ιούλιο, υπόκεινται σε μεγάλες αυξομειώσεις κατά την διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Αυτό συμβαίνει καθώς την ημέρα παράγεται οξυγόνο με την φωτοσύνθεση που μπορεί να φτάσει έως 14mg/l λόγω ευτροφισμού, ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας, όπου λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες της αναπνοής, το διαλυμένο οξυγόνο μειώνεται και λαμβάνει κρίσιμες τιμές. Η ελάχιστη τιμή σημειώνεται νωρίς το πρωί.
- Οι συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου ήταν χαμηλότερες τον Ιούλιο του 2006 και κυμάνθηκαν από μηδενικές τιμές έως 0,06 mg/l (Χάρτες 85,86) από τον Ιούλιο του 2005 που κυμάνθηκαν από 0,06-0,12mg/l (Χάρτες 55,56). Οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου οι οποίες ήταν υψηλές τόσο τον Ιούλιο του 2005 όσο και τον Ιούλιο του 2006 κράτησαν σε χαμηλά επίπεδα τις συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου καθώς δεν ευνοούνταν η βιολογική διεργασία της αμμωνιοποίησης.
- Οι συγκεντρώσεις του νιτρικού αζώτου ήταν χαμηλότερες τον Ιούλιο του 2006 και κυμάνθηκαν από 0,092-0,1 mg/l (Χάρτες 87,88) από τον Ιούλιο του 2005 που οι συγκεντρώσεις κυμάνθηκαν από 0,133-0,25mg/l (Χάρτες 57,58). Αυτό

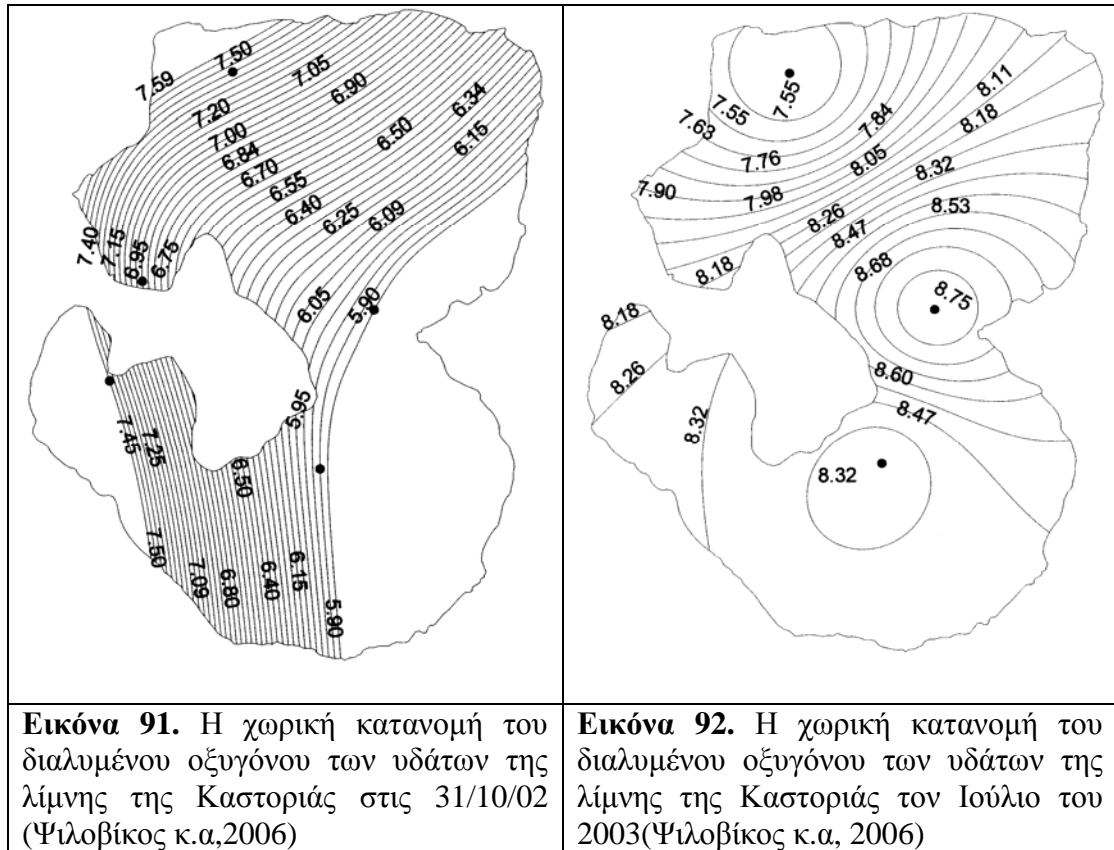
δηλώνει την δέσμευση του αζώτου από τα αζωτοβακτήρια καθώς αυτά αναπτύσσονται.

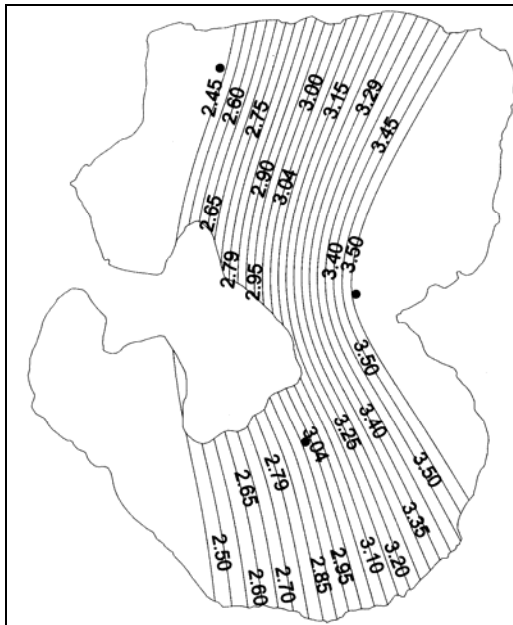
- Οι συγκεντρώσεις των ορθοφωσφορικών αντίθετα ήταν υψηλότερες κατά τον Ιούλιο του 2006 (χάρτες 89,90) από 0,022 mg/l έως 0,124 mg/l από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις που παρατηρήθηκαν κατά τον Ιούλιο του 2005 και οι οποίες κυμάνθηκαν από 0,01 mg/l -0,062 mg/l(Χάρτες 59,60). Αυτό πιθανό να οφείλεται στο ότι οι χαμηλότερες τιμές οξυγόνου που παρατηρήθηκαν τον Ιούλιο του 2006 να ενισχύουν την αύξηση των ορθοφωσφορικών καθώς στις μικρότερες συγκεντρώσεις οξυγόνου έχουμε περαιτέρω απελευθέρωση φωσφόρου από το ίζημα .

Γ) Αποτελέσματα για τον μήνα Οκτώβριο

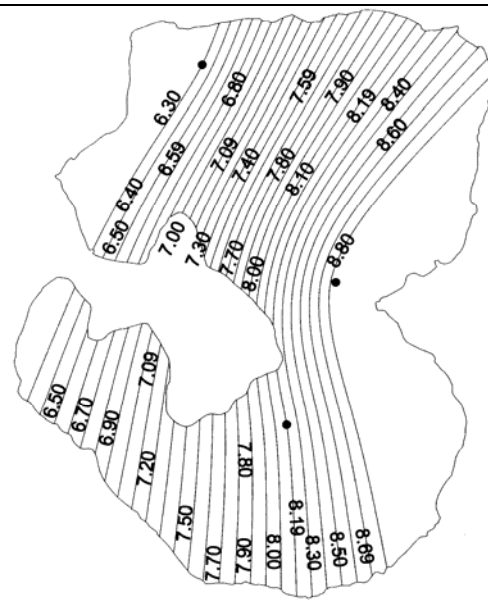
- Τον Οκτώβριο του 2005 η θερμοκρασία κυμάνθηκε από 14-14,5 °C (χάρτες 61,62) οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου από 4,66 mg/l έως 5,6mg/l (Χάρτες 63,64).
- Οι συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου από 0,01 mg/l έως 0,11 mg/l (Χάρτες 65,66) έχουν αυξητική τάση σε σχέση με τις τιμές που παρατηρήθηκαν κατά τον Ιούλιο του 2005 (Χάρτες 55,56) αυτό δικαιολογείται από τις παρατεταμένες συνθήκες μειωμένου διαλυμένου οξυγόνου.
- Οι συγκεντρώσεις του νιτρικού αζώτου κυμάνθηκαν από 0,18 έως 0,25 mg/l (Χάρτες 67,68) σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από αυτές που σημειώθηκαν κατά τον Ιούλιο του 2005 (Χάρτες 57,58) και στους σταθμούς που βρίσκονται κοντά στις εκβολές ρεμάτων και στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις εξαιτίας των αποπλύσεων των εδαφών .
- Οι συγκεντρώσεις των ορθοφωσφορικών κυμάνθηκαν από 0,118-0,186 mg/l (Χάρτες 69,70) σε υψηλότερες συγκεντρώσεις με τις αντίστοιχες του μήνα Ιουλίου

2005 (Χάρτες 59,60). Αυτό δικαιολογείται καθώς τον μήνα Ιούλιο λόγω της ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού λαμβάνει χώρα δέσμευση του αζώτου και του φωσφόρου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις μειωμένες τιμές διαλυμένου οξυγόνου, ευνοεί την αύξηση των ορθοφωσφορικών με απελευθέρωση φωσφόρου από το ίζημα.

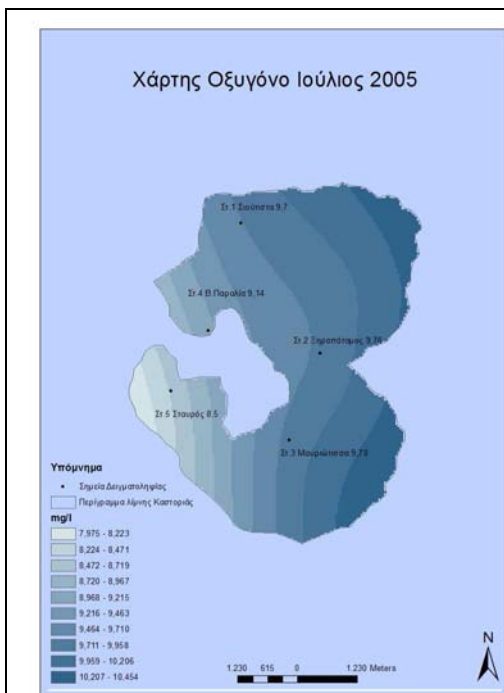




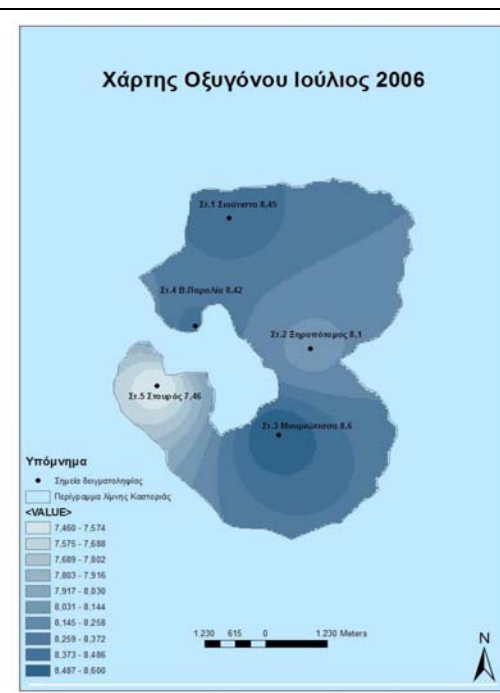
Εικόνα 93. Η χωρική κατανομή του διαλυμένου οξυγόνου των υδάτων της λίμνης της Καστοριάς στις 30/07/04 (Ψιλοβίκος κ.α,2006)



Εικόνα 94. Η χωρική κατανομή του διαλυμένου οξυγόνου των υδάτων της λίμνης της Καστοριάς στις 26/10/04(Ψιλοβίκος κ.α,2006)



Εικόνα 95. Η χωρική κατανομή του διαλυμένου οξυγόνου των υδάτων της λίμνης της Καστοριάς τον Ιούλιο του 2005



Εικόνα 96. Η χωρική κατανομή του διαλυμένου οξυγόνου των υδάτων της λίμνης της Καστοριάς τον Ιούλιο του 2006

Συγκρίνοντας τους παραπάνω χάρτες οι οποίοι απεικονίζονται στις εικόνες 91,92, 93,94,95 και 96 προκύπτει ότι η χαμηλότερη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου παρατηρήθηκε τον Ιούλιο του 2004 και η υψηλότερη τον Ιούλιο του 2005. Είναι αναγκαίο να σημειώσουμε ότι η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες εξαρτάται από την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού και τις βιολογικές διεργασίες που πραγματοποιούνται. Υπάρχει έντονη ημερήσια διακύμανση, με αποτέλεσμα η μετρούμενη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου να εξαρτάται και από την ώρα που γίνεται η δειγματοληψία. Νωρίς το πρωί όπου η διεργασία της φωτοσύνθεσης είναι χαμηλή, παρατηρούνται χαμηλές συγκεντρώσεις, ενώ το μεσημέρι όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι έντονη και η φωτοσύνθεση αυξάνει, η συγκέντρωση του οξυγόνου έχει τιμές ιδιαίτερα αυξημένες.

3.3 Έλεγχος χρονικής μεταβολής τάσεων

Μελετώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων των σταθμών 1 και 2 στις θέσεις Σιούτιστα και Ξηροπόταμο αντίστοιχα, εφαρμόστηκε το μη παραμετρικό κριτήριο Spearman για τον έλεγχο ύπαρξης τάσεων και σύμφωνα με αυτό προκύπτει ότι τα αποτελέσματα δεν εμφανίζουν τάση. Έτσι δεν είχε νόημα η εφαρμογή μοντέλων και η διερεύνηση του βέλτιστου από αυτά στα πλαίσια της χρονικής προσομοίωσης.

Στο πίνακα 13 που ακολουθεί φαίνονται ότι δεν υπάρχει τάση για κάθε μια από τις υπό εξέταση παραμέτρους του Σταθμού 1:

Πίνακας 13 Έλεγχος τάσης φυσικοχημικών παραμέτρων σταθμού 1

Παράμετρος	Αριθμός μετρήσεων	R_{SP}	tt	Τάση
Τ επιφάνειας	34	-0,0088	-0,04	Δεν υπάρχει τάση
O_2 επιφάνειας	34	-0,1086	-0,618	Δεν υπάρχει τάση
$NO_3 - N$	32	-0,2152	-1,20	Δεν υπάρχει τάση
$NH_3 - N$	32	-0,037	0,20	Δεν υπάρχει τάση
$PO_4 - P$	32	-0,39	-2,041	Δεν υπάρχει τάση

Ο πίνακας 14 που ακολουθεί αφορά τον έλεγχο τάσης των μετρήσεων στον σταθμό 2 .

Πίνακας 14 Έλεγχος τάσης φυσικοχημικών παραμέτρων σταθμού 1

Παράμετρος	Αριθμός μετρήσεων	R_{SP}	tt	Τάση
Τ επιφάνειας	34	0,1792	1,030	Δεν υπάρχει τάση
O_2 επιφάνειας	34	-0,1303	-0,74	Δεν υπάρχει τάση
$NO_3 - N$	32	-0,32	-1,86	Δεν υπάρχει τάση
$NH_3 - N$	32	-0,166	-0,924	Δεν υπάρχει τάση
$PO_4 - P$	32	-0,44	-2,33	Δεν υπάρχει τάση

Σύμφωνα με τους πίνακες 13 και 14 δεν υπάρχει τάση για καμιά από τις παραμέτρους που μετρήθηκαν έτσι δεν έγινε περαιτέρω έλεγχος μοντέλων για την επιλογή του καλύτερα προσαρμοσμένου.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ –ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, είχε πολλαπλούς στόχους, οι οποίοι επιγραμματικά αναφέρονται στα παρακάτω :

- I. Τη συστηματική παρακολούθηση των φυσικοχημικών παραμέτρων της λίμνης Καστοριάς κατά την τετραετία 2002-2006 σε μηνιαία βάση και τη διαγραμματική παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο χρόνο.
- II. Τον σχεδιασμό δισδιάστατων χαρτών με το σύστημα γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (ArcMap 9) και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που αφορούν τον χειμώνα, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο του 2005 & 2006.
- III. Την εξαγωγή συμπερασμάτων για την υφιστάμενη οικολογική κατάσταση της λίμνης και
- IV. Τη διατύπωση προτάσεων για την παρακολούθηση της ποιότητας του υδάτινου δυναμικού της.

Κατ' αρχήν, η λίμνη της Καστοριάς παρακολουθήθηκε συστηματικά επί πενταετίας (2002-2006) με αρχικά τρεις και στη συνέχεια με πέντε θέσεις παρακολούθησης σε κρίσιμα περιβαλλοντικά σημεία της λίμνης. Η παρακολούθηση αυτή μας παρείχε αξιόπιστες χρονοσειρές δεδομένων. Οι παράμετροι παρακολούθησης είναι το διαλυμένο οξυγόνο στην επιφάνεια και σε 2,5m βάθος, τα αμμωνιακά, τα νιτρώδη, τα νιτρικά, τα ορθοφωσφορικά ιόντα, το pH και η αγωγιμότητα. Πέντε θεωρήθηκαν οι βασικότερες παράμετροι παρακολούθησης:

- I. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια
- II. Το διαλυμένο οξυγόνο στην επιφάνεια
- III. Τα νιτρικά ιόντα
- IV. Τα αμμωνιακά ιόντα

V. Τα ορθοφωσφορικά ιόντα

Για τις πέντε αυτές παραμέτρους σχεδιάστηκαν δισδιάστατοι χάρτες με τη βοήθεια των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (ArcMap 9.1). Κατασκευάστηκαν χάρτες ισοποσοτικών καμπύλων για τους μήνες Φεβρουάριο 2005, Ιούλιο 2005, Οκτώβριο του 2005, Φεβρουάριο 2006, Ιούλιο 2006, δηλαδή για πέντε χρονικές περιόδους επί διετία (2005-2006).

Δύο μέθοδοι προσομοίωσης εφαρμόζονται και συγκρίνονται μεταξύ τους: Η μια είναι η μέθοδος IDW(Inverse Distance Weight) και η δεύτερη είναι η μέθοδος Splines. Οι αλγόριθμοι και των δυο μεθόδων είναι προσδιοριστικοί-αιτιοκρατικοί. Ύστερα από σύγκριση των δυο μεθόδων μεταξύ τους προκύπτει ότι η μέθοδος IDW είναι η πιο αξιόπιστη γιατί οι χάρτες των ισοποσοτικών καμπύλων παρεμβολής δίνουν πιο ομοιόμορφη κατανομή στην επιφάνεια της λίμνης και διέρχονται εγγύτερα από τα σημεία μέτρησης. Η μέθοδος splines δεν μπορεί να αποδώσει με αξιοπιστία της ισοποσοτικές καμπύλες και γίνεται «extrapolation» σε αρνητικές τιμές, κάτι που δεν ανταποκρίνεται στο φυσική έννοια των μεγεθών αυτών. Το πλεονέκτημα τους όμως έναντι των γεωστατιστικών μεθόδων (Kriging) είναι ότι αρκούν και τρεις τιμές μετρήσεων στην επιφάνεια της λίμνης για την παραγωγή των ισοποσοτικών καμπύλων. Αντίθετα η γεωστατιστική μέθοδο (Kriging) είναι μεν πιο αξιόπιστη και μπορεί να δώσει και στατιστικά στοιχεία για την κατανομή των σφαλμάτων, αλλά χρειάζεται τουλάχιστον δέκα (10) σημεία μετρήσεων για να μπορέσει να εφαρμοστεί.

Η εξέταση των παραπάνω φυσικοχημικών παραμέτρων και των συγκεντρώσεων τους οδήγησε στα παρακάτω σημαντικά συμπεράσματα :

- 1) Με βάση τις τιμές των ορθοφωσφορικών ιόντων και τα προτεινόμενα από τον ΟΟΣΑ όρια των παραμέτρων αυτών για την κατάταξη των λιμνών, φαίνεται πως η λίμνη είναι ευτροφική έχοντας υπόψη την σχέση $1 \text{ mg P/L} = 3.066 \text{ mg}$

PO_4^{3-}/L . Βέβαια κατά την διάρκεια του έτους 2002-2003 η λίμνη παρουσιαζόταν υπερευτροφική. Αξίζει να σημειώσουμε ότι τον Σεπτέμβριο του 2003 ένας μεγάλος αριθμός ψαριών εξοντώθηκε εξαιτίας των ανοξικών συνθηκών.

- 2) Η οικολογική κατάσταση της λίμνης έχει βελτιωθεί τα τελευταία χρόνια. Οι κλιματολογικές συνθήκες προκάλεσαν την ανανέωση των νερών, το μέσο ύψος βροχόπτωσης ήταν υψηλό και τα θυροφράγματα στο ρέμα Γκιόλι, σημείο εξόδου της λίμνης προς τον Αλιάκμονα, παρέμειναν ανοικτά για παρατεταμένο χρονικό διάστημα. Η διαφάνεια του νερού τον μήνα Ιούλιο του 2006 έφτασε τα 2,5 m ενώ τον ίδιο μήνα του 2005 ήταν 0,90m.
- 3) Οι σταθμοί 1 και 2 στις θέσεις Σιούτιστα και Ξηροπόταμος αντίστοιχα παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές νιτρικών ιόντων πιθανώς καθώς βρίσκονται κοντά στις εκβολές ρεμάτων.
- 4) Η συγκέντρωση του P_2O_5 συνολικά από το 2002 έως το 2006 όπου μετρήθηκαν είναι μικρότερη των $< 5 \text{ mg/l}$ συνθήκη για την καταλληλότητα του πόσιμου νερού σύμφωνα με την Κοινή Υπουργική Απόφαση με αριθμό Υ2/2600/2001 (ΦΕΚ 892/11-07-2001) για την ποιότητα του πόσιμου νερού, σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/EK του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- 5) Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης κατά Wetzel (1983) οι τιμές του ανόργανου αζώτου κυμαινόταν στα όρια του ευτροφισμού κατά τα έτη 2004,2005 και 2006.
- 6) Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών και νιτρωδών ιόντων το 2005 και το 2006 είναι στα όρια του πόσιμου νερού σύμφωνα με την Κοινή Υπουργική Απόφαση με αριθμό Υ2/2600/2001 (ΦΕΚ 892/11-07-2001) για την ποιότητα

του πόσιμου νερού, σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/EK του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 3^{ης} Νοεμβρίου του 1998 όπου καθορίζεται ο χαρακτηρισμός της ποιότητας των πόσιμων υδάτων. Η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων δεν πρέπει να ξεπερνά τα 50 μg/l και των νιτρωδών τα 0,50mg/l και εξασφαλίζεται επίσης ο όρος $[\text{νιτρικά}]/50 + [\text{νιτρώδη}]/3 < 1$ σύμφωνα με την Υπουργική απόφαση Y2/2600/2001 (ΦΕΚ 892/11-07-2001).

- 7) Όσον αφορά την συγκέντρωση NH_4^+ , σύμφωνα με την υπ' αρ.οικ.46399/1352(ΦΕΚ 438B,3-7-86) Διυπουργική Απόφαση για τα πρότυπα διαβίωσης ψαριών των γλυκών υδάτων και ειδικότερα των κυπρινιδών, βρισκόταν κάτω από το ανώτερο επιτρεπόμενο όριο του 1mg/l.
- 8) Το pH βρίσκεται κάτω από το ανώτερο επιτρεπόμενο όριο. Ξεπερνά το επιθυμητό όριο 5,5-8,5 για την διαβίωση των κυπρινιδών τον Απρίλιο και Μάιο του 2006 ενώ τον Ιούλιο που ήταν 8,55 , βρίσκεται οριακά στο επιθυμητό όριο.
- 9) Το διαλυμένο οξυγόνο μειωνόταν αισθητά αλλά ποτέ δεν έφτασε σε επίπεδο ανοξικών συνθηκών. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού και του φθινοπώρου, καταναλώνεται ως επί το πλείστον κατά τη διαδικασία αποικοδόμησης των φυκών που είναι η βιολογική διαδικασία που επικρατεί σ' αυτές τις περιόδους.
- 10) Το BOD₅ κυμάνθηκε από 0-8 mg/l. Οι χαμηλότερες τιμές σημειωνόταν τον χειμώνα και υψηλότερες αρχές του φθινοπώρου τον μήνα Σεπτέμβριο. Ας σημειωθεί ότι το επιθυμητό όριο BOD για την διαβίωση κυπρινιδών είναι η τιμή 6 mg/l.

Σύμφωνα με τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η λίμνη της Καστοριάς είναι μια λίμνη ευτροφική, έχει υψηλό φορτίο θρεπτικών σε σχέση με τον

όγκο του νερού και πυκνή ανάπτυξη φυκών στα επιφανειακά νερά. Η υδάτινη στήλη παρουσιάζει θολερότητα και η βιολογική δραστηριότητα είναι υψηλή σε όλα τα επίπεδα της υδάτινης στήλης.

Τα νερά παρουσιάζουν συνθήκες χαμηλού επιπέδου διαλυμένου οξυγόνου την διάρκεια του καλοκαιριού. Κυρίαρχα ψάρια είναι αυτά τα είδη που παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα στις χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου όπως η πεταλούδα (*Caracius auratus gibelio*) και το ηλιόψαρο (*Lepomis gibbosus*) σύμφωνα με τα στοιχεία του συλλόγου επαγγελματιών ψαράδων.

Ο ευτροφισμός της είναι αποτέλεσμα των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που τις τελευταίες δεκαετίες έλαβαν χώρα σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής. Τα επεισόδια ευτροφισμού αφορούν τους καλοκαιρινούς μήνες με αποτέλεσμα τις χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου, το έντονο πράσινο χρώμα στα επιφανειακά νερά, αλλά και την κακοσμία που εκλύεται κατά την αποσύνθεση των φυκών. Κατά καιρούς όπως αναφέρθηκε παρουσιάστηκαν κρούσματα μαζικής θανάτωσης ψαριών.

Η λίμνη της Καστοριάς παρουσιάζει δυο εναλλακτικές οικολογικές καταστάσεις ευτροφισμού:

- Την ευνοϊκή κατάσταση καθαρού νερού όπου κυριαρχούν τα παράκτια μακρόφυτα και
- Την υποβαθμισμένη θολή οικολογική κατάσταση όπου κυριαρχούν η πυκνή άνθιση φυτοπλαγκτού.

Η διαδοχή από την κατάσταση κυριαρχίας των μακρόφυτων στην κυριαρχία του φυτοπλαγκτού προκαλεί μεταβολές στην λειτουργία του λιμναίου οικοσυστήματος και την βιοποικιλότητά του. Η συγκράτηση των θρεπτικών από τα μακρόφυτα δημιουργεί ένα περιβάλλον πιο ήπιο, το οποίο εμποδίζει την ανάπτυξη του

φυτοπλαγκτού στο νερό και συμβάλλει στην διατήρηση της καλής οικολογικής κατάστασης του νερού.

Η λίμνη της Καστοριάς την τελευταία διετία 2005-2006 έχει παρουσιάσει βελτίωση σε σχέση με την τριετία 2002-2003. Η οικολογική κατάστασή της κατά την διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού του 2006 μπορεί να χαρακτηριστεί ως ευνοϊκή ευτροφική κατάσταση του καθαρού νερού με την επικράτηση των μακρόφυτων. Το 2006 η διαύγεια αυξήθηκε με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η είσοδος του ηλιακής ενέργειας ως τον πυθμένα επιτρέποντας την ραγδαία ανάπτυξη των μακρόφυτων σε όλη την έκταση της λίμνης ακόμη και σε περιοχές που τα τελευταία χρόνια είχαν εξαφανιστεί, όπως τα μεσόνερα.

Η παρουσία των μακροφύτων και η διατήρησή τους στην λίμνη της Καστοριάς αποτελεί το κλειδί για την μετάβαση της λίμνης από την υποβαθμισμένη θολή κατάσταση στην ευνοϊκή κατάσταση του καθαρού νερού (Hietala et al. 2004, Sondergaard et al. 2003).

Υπάρχουν αρκετές πιθανές εξηγήσεις για την σημασία των μακρόφυτων:

- Τα μακρόφυτα ελαττώνουν την επανειώριση των ιζημάτων
- Ενισχύουν την απονιτροποίηση
- Απομακρύνουν τα θρεπτικά από την υδάτινη στήλη και τα ιζήματα
- Αποτελούν κατάλληλα πεδία αναπαραγωγής των ψαριών
- Χρησιμοποιούνται ως καταφύγιο για την προστασία του ζωοπλαγκτού και του βένθους (Sagrario et al. 2005, Beklioglu 1999).

Όμως τα θρεπτικά φορτία παίζουν το σημαντικότερο ρόλο για την διατήρηση της ευνοϊκής κατάστασης ή την μετατροπή της στην υποβαθμισμένη θολή κατάσταση. Ο ολικός φώσφορος είναι αναγκαίο να κυμαίνεται από 0,08-0,15 mg/l

για την διατήρηση της ευνοϊκής κατάστασης (Sagrario et al., 2005) ενώ το ολικό άζωτο να κυμαίνεται από 1,2-2 mg/l (Sagrario et al., 2005).

Η λίμνη της Καστοριάς αποτελεί περιοχή Κοινοτικού ενδιαφέροντος του Πανευρωπαϊκού Οικολογικού Δικτύου Natura 2000 με τον κωδικό GR1320001-Bio GREECE '99. Σύμφωνα και με την οδηγία 92/43 είναι αναγκαίο στην περιοχή αυτή να γίνει ειδικό διαχειριστικό σχέδιο, στο οποίο θα εξειδικεύονται συγκεκριμένες δράσεις και μέτρα διαχείρισης τα οποία θα στοχεύουν και θα πρέπει να διασφαλίζουν την καλή οικολογική κατάσταση διατήρησης των τύπων οικοτόπων (βλάστησης) και των ειδών χλωρίδας και πανίδας που απαντούν στην περιοχή και αποτέλεσαν τους βασικούς λόγους για την ένταξη της περιοχής στο Δίκτυο. Ο Δήμος Καστοριάς προχώρησε στην εκπόνηση και εφαρμογή μελετών και σχεδίων, για την δημιουργία φορέα διαχείρισης, καθώς και την εφαρμογή μέτρων προστασίας.

Σύμφωνα με το σχεδιασμό του ΥΠΕΧΩΔΕ αναμένεται το επόμενο διάστημα να συσταθεί ο φορέας διαχείρισης των προστατευόμενων περιοχών (το σχέδιο βρίσκεται στο Συμβούλιο της Επικρατείας), ο οποίος θα έχει την ευθύνη για την εφαρμογή των διαχειριστικών μέτρων και την παρακολούθηση της λειτουργίας των οικοσυστημάτων και θα προτείνει τυχόν διορθωτικές παρεμβάσεις με κύριο σκοπό την διατήρηση της βιοποικιλότητας. Συγκεκριμένα έχουν υπογραφεί οι κανονισμοί λειτουργίας των φορέων διαχείρισης των προστατευόμενων περιοχών, ώστε να μπορούν να χρηματοδοτηθούν. Επίσης υπογράφηκε το Προεδρικό Διάταγμα και βρίσκεται σε επεξεργασία στο Συμβούλιο της Επικρατείας για τον χαρακτηρισμό της λίμνης Καστοριάς ως περιοχή προστασίας της Φύσης. Η παρακολούθηση των μέτρων διαχείρισης θα πρέπει να συνοδεύεται από την παρακολούθηση διαφόρων δεικτών περιβάλλοντος (Μουστάκα – Γούνη, 2000).

Η συστηματική παρακολούθηση της κατάστασης της λίμνης αποτελεί ουσιαστικό εργαλείο για την λήψη αποφάσεων για την σωστή διαχείρισή της. Η συνεχής και συχνή παρακολούθηση και καταμέτρηση των διαφόρων φυσικοχημικών παραμέτρων αλλά και βιολογικών δεικτών είναι αναγκαίο να πραγματοποιείται σε αρκετά αντιπροσωπευτικά σημεία. Ανάμεσα στις φυσικές, χημικές, βιολογικές και οικολογικές παραμέτρους που πρέπει να παρακολουθούνται με μετρήσεις διαφορετικής περιοδικότητας, σύμφωνα και με την βασική κατεύθυνση της Οδηγίας 2000/60, υπάρχουν και κάποιες που μπορούν να παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο και είναι ενδεικτικές μιας γενικής εικόνας της ποιότητας ανά πάσα στιγμή (pH, αγωγιμότητα, θερμοκρασία, διαλυμένο οξυγόνο και θολότητα). Υπάρχει κατάλληλη τεχνολογία που επιτρέπει την τηλεμετάδοση των δεδομένων και την ανάκτηση τους από οποιαδήποτε σημείο. Υπάρχουν επίσης ευαίσθητες περιοχές όπου υπάρχουν σταθερές πηγές ρύπων όπως περιοχές κοντά σε ρέματα. Η αυτογραφική παρακολούθηση μπορεί να βοηθήσει στη λήψη κατασταλτικών ή προληπτικών μέτρων, επεκτεινόμενη από δίκτυο συλλογής δεδομένων σε σύστημα ειδοποίησης, με την οριοθέτηση των αποδεκτών τιμών των παραμέτρων στο λογισμικό που χρησιμοποιείται. Με την συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων μπορεί να εκπονηθεί ειδικό πρόγραμμα μείωσης της ρύπανσης του νερού της λίμνης με καθορισμό των κατευθυντήριων και οριακών τιμών ποιότητας του νερού όπως και στη λίμνη Βεγορίτιδα βάσει της υπ' αριθμού 15782/1849 διυπουργικής απόφασης. Η επιλογή των παραμέτρων και των σημείων εγκατάστασης θέσεων σταθμών παρακολούθησης είναι αναγκαίο να γίνει βάση των δεδομένων και σε συνεργασία με τους φορείς της Τοπικής Αυτοδιοίκησης.

Στην λίμνη Καστοριάς θα μπορούσαν να τοποθετηθούν δυο σταθμοί κοντά στην πόλη, ένας σταθμός στην νότια και ένας σταθμός στην βόρεια παραλία έτσι

ώστε να υπάρχει ένα δίκτυο συλλογής δεδομένων οργανωμένο σε σύστημα τηλεμετάδοσης και ειδοποίησης. Με τον τρόπο αυτό οποιαδήποτε περιστατικό ρύπανσης από εξωτερική πηγή, να έχει την δυνατότητα να αποδεικνύεται μέσω ενός δελτίο συναγερμού καθώς θα εντοπίζεται η οποιαδήποτε υπέρβαση των αποδεκτών ορίων. Επίσης ένας σταθμός είναι αναγκαίο να τοποθετηθεί στην θέση Σιούτιστα όπου καταλήγουν αρκετά ρέματα, τα οποία εμπλουτίζουν την λίμνη με φορτία αζώτου και φωσφόρου από τις εκπλύσεις των καλλιεργούμενων εδαφών. Τέλος ένας σταθμός τηλεμέτρησης είναι αναγκαίο να τοποθετηθεί κοντά στον Ξηροπόταμο, το μεγαλύτερο ρέμα που καταλήγει την λίμνη και μεταφέρει πλήθος φερτών υλικών.

Μέσα από το δίκτυο εφαρμογής αυτού του συστήματος τηλεμέτρησης μέσω αυτόνομων ενεργειακά σταθμών υπάρχει η δυνατότητα καταμέτρησης των κάτωθι παραμέτρων :

- Στάθμη νερού
- Θερμοκρασία
- Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου
- PH
- Πυκνότητα νερού
- Νιτρικά
- Αμμωνιακά
- Φωσφορικά

Με την εφαρμογή αυτή θα συλλέγονται τα δεδομένα, οι χρονοσειρές αποτελεσμάτων, τα δελτία αξιολόγησης της ποιότητας σε εικοσιτετράωρη βάση και τα δελτία συναγερμών, όταν σηματοδοτείται η υπέρβαση των αποδεκτών ορίων. Με

άλλα λόγια η εγκατάσταση των σταθμών σε κομβικά σημεία, μπορεί να δώσει πολύτιμη πληροφόρηση για τις διακυμάνσεις της ποιότητας των υδάτων, για τις περιοχές προέλευσης των ρυπαντικών φορτίων, και για το χρόνο εισροής τους στο υδάτινο σύστημα.

Όσο πιο πυκνό και εκτεταμένο είναι το δίκτυο των σταθμών μέσα στην λίμνη, τόσο πιο εποπτική και ακριβής είναι η παρακολούθηση της προέλευσης των ρυπαντικών φορτίων.

Οι παράμετροι που μετρώνται δεν είναι οι ίδιοι οι ρύποι, αλλά σχετίζονται με τους ρύπους που επιδρούν στην ποιότητα του νερού της λίμνης. Έτσι απαιτείται ένα χρονικό διάστημα που αφενός πρέπει να περιλαμβάνει περίοδο αιχμής ρυπογόνων δραστηριοτήτων και αφετέρου να γίνει σε όσο το δυνατόν περισσότερα χρονικά σημεία η σύγκριση των αυτογραφικών μετρήσεων με πλήρεις χημικές αναλύσεις, ώστε να συσχετιστούν οι φυσικοχημικές παράμετροι με την σύσταση του νερού.

Η ερμηνεία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι αναγκαίο να ορίζεται από την ανάλογη κατηγορία αξιολόγησης ποιότητας του επιφανειακού νερού με στόχο πάντα την εξακρίβωση της οικολογικής κατάστασης της λίμνης και με στόχο την διατήρηση της καλής οικολογικής της κατάστασης.

Ένα τέτοιο σύστημα παρακολούθησης έπεται από ένα χρόνο πλήρους πιλοτικής λειτουργίας του είναι σε θέση να δώσει πληροφορίες σχετικά με:

- Τα επίπεδα διακύμανσης των παραμέτρων ποιότητας υπό κανονικές συνθήκες και υπό συνθήκες πίεσης
- Την ταυτοποίηση των ρυπογόνων εστιών
- Την οικολογική κατάσταση της λίμνης κατά την χειμερινή περίοδο
- Την οικολογική κατάσταση της λίμνης κατά την καλοκαιρινή περίοδο όπου εμφανίζεται η άνθιση του φυτοπλαγκτού

- Την άμεση ειδοποίηση για οποιαδήποτε περιστατικό που δημιουργεί μια ραγδαία επιδείνωση των φυσικοχημικών παραμέτρων π.χ η διαπίστωση ενός ρυπογόνου επεισοδίου, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην λήψη έκτακτων μέτρων.

Βασικά υπάρχουν δυο τρόποι με τους οποίους η βάση δεδομένων που δημιουργείται με ένα πρόγραμμα παρακολούθησης μπορεί να αξιοποιηθεί. Σε ένα περιορισμένο αριθμό περιπτώσεων, οι αποφάσεις διαχείρισης λαμβάνονται βασιζόμενες άμεσα από την μελέτη των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης. Αυτές οι περιπτώσεις μπορεί να είναι θέματα που αφορούν την δημόσια υγεία και ζητήματα προκαθορισμένων κριτηρίων ποιότητας.

Όμως τυπικά η χρήση των δεδομένων παρακολούθησης για την λήψη αποφάσεων είναι λιγότερο άμεση. Μια απλή μελέτη των δεδομένων από μόνη της δεν είναι αποτελεσματική, έτσι είναι αναγκαίο να κατανοηθεί η αλληλεπίδραση των σύνθετων διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο υδάτινο οικοσύστημα της λίμνης και να προταθούν άμεσες διαχειριστικές ενέργειες όπως η δημιουργία κριτηρίων ποιότητας νερού.

Τα δεδομένα είναι εφικτό να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα ερευνών στήριξης αναλυτικών διεργασιών που σχεδιάζονται για να επιλύσουν ειδικά διαχειριστικά ζητήματα.

Η χρήση των δεδομένων παρακολούθησης μπορεί να οδηγήσει στην περαιτέρω ανάπτυξη χωρικών μοντέλων, όπως έγινε στην παρούσα εργασία με την βοήθεια του γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (Γ.Σ.Π). Το μοντέλο θα αποτελέσει εργαλείο ανάλυσης το οποίο θα έχει την δυνατότητα πρόβλεψης της ανταπόκρισης του λιμναίου συστήματος σε διάφορα σενάρια πηγών ρύπανσης.

Με τον τρόπο αυτό η συμπεριφορά του λιμναίου οικοσυστήματος σε τεχνικές απομάκρυνσης θρεπτικών ή τοξικών ουσιών, σημειακών ή μη σημειακών πηγών ρύπανσης, μπορεί να αποτιμηθεί. Στην συνέχεια η πιο κατάλληλη τεχνική μπορεί να επιλεγεί για να εφαρμοστεί.

Για παράδειγμα διαχειριστικά σχέδια που αφορούν τον έλεγχο του φωσφόρου για να θεωρηθούν επιτυχημένα θα πρέπει να βελτιώσουν τα προβλήματα που προκαλούν οι υψηλές συγκεντρώσεις του φωσφόρου όπως το χαμηλό επίπεδο οξυγόνου και την άνθιση του φυτοπλαγκτού. Η βάση των δεδομένων παρακολούθησης σε συνδυασμό με τα μοντέλα μπορεί να ποσοτικοποιήσει τη συνεισφορά των θρεπτικών τόσο από τις σημειακές όσο και από τις μη σημειακές πηγές ρύπανσης και στην συνέχεια να καθοριστούν οι περιορισμοί και οι κανόνες διαχείρισης.

Συμπερασματικά με τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός δικτύου συνεχούς ποιοτικής αλλά και ποσοτικής παρακολούθησης, προτείνεται αυτό να αποτελείται από τέσσερις ανεξάρτητους σταθμούς, οι οποίοι θα καταγράφουν μια σειρά παραμέτρων σε συνεχή βάση και θα απεικονίζουν την ποιοτική και ποσοτική κατάσταση της λίμνης. Οι καταγραφές θα μεταφέρονται μέσω τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε πραγματικό χρόνο, σε προκαθορισμένους αποδέκτες-τελικούς χρήστες. Για τον καλύτερο σχεδιασμό σε πρώτη φάση θα ήταν προτιμότερο να συγκεντρωθούν υδρολογικά – υδρογεωμορφολογικά στοιχεία, χρήσεις γης, σημεία ρυπαντικής απειλής έτσι ώστε να προκύψουν οι καταλληλότερες θέσεις για την εγκατάσταση του δικτύου παρακολούθησης. Σε δεύτερη φάση υλοποίησης θα εγκατασταθεί το δίκτυο. Τα δεδομένα στην συνέχεια θα αποστέλλονται στους τελικούς χρήστες, οι οποίοι θα καθοριστούν και θα εκπαιδευτούν για επεξεργασία και αξιολόγηση. Μπορούν να

προκύψουν δυναμικοί χάρτες όπου θα προσδιορίζονται οι ζώνες τρωτότητας και οι κυριότερες θέσεις ρυπαντικής απειλής.

Επίσης, εκτός από την παρακολούθηση και την αποτίμηση των αβιοτικών στοιχείων ποιότητας του νερού, η παρακολούθηση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού και της βιομάζας των μακρόφυτων είναι αναγκαία για την ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης της λίμνης. Η παρακολούθηση των πληθυσμών φυτοπλαγκτού γενικά βασίζεται στις μετρήσεις της βιομάζας, η οποία πετυχαίνεται με την μέτρηση της χλωροφύλλης *a* αλλά και στην ταυτοποίηση των ειδών που την απαρτίζουν.

Η μέτρηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης- *a* μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέθοδο της τηλεπισκόπησης μέσω δορυφόρου και το ίδιο μπορεί να γίνει για τον προσδιορισμό της εξάπλωσης των κοινοτήτων μακρόφυτων. Τα αποτελέσματα της τηλεπισκόπησης μπορεί να παρουσιαστούν με την χρήση των Γ.Σ.Π. Βέβαια με την μέθοδο της τηλεπισκόπησης δεν μπορεί να γίνει η ταυτοποίηση των ειδών και η σύνθεση της φυτοπλαγκτονικής κοινότητας. Η χλωροφύλλη *a* είναι μέθοδος προσδιορισμού του φυτοπλαγκτού καθώς υπάρχει σε όλα τα είδη. Όμως το φυτοπλαγκτό περιέχει μια αναλογία επιπρόσθετων χρωματοφόρων ουσιών όπως οι καροτίνες και οι άλλες φυκοπρωτείνες πολλές από τις οποίες είναι ταξινομικά σημαντικές για τις οποίες είναι αναγκαία περαιτέρω έρευνα. Γενικά η τεχνική της τηλεπισκόπησης είναι μια ευαίσθητη τεχνική παρακολούθησης των χωρικών και εποχικών αλλαγών της κατάστασης των κοινοτήτων των μακρόφυτων όπου επιτρέπει την ταυτοποίηση της δυναμικής τους στα επιφανειακά στρώματα. Όσον αφορά τα βαθύτερα στρώματα είναι αναγκαίο να γίνονται δειγματοληψίες και εργαστηριακές μετρήσεις.

Οι χάρτες των δεδομένων που συλλέγονται μέσω των αυτογραφικών συστημάτων και αφορούν μικρό σχετικά αριθμό σε σταθμούς δειγματοληψίας, μπορούν να τοποθετηθούν στο Γ.Σ.Π., το οποίο είναι ένα εργαλείο αποτίμησης του τροφικού επιπέδου και της ποιότητας της λίμνης. Οι παραδοσιακές μέθοδοι συλλογής δεδομένων, αν και έχουν ακρίβεια, είναι δαπανηρές, χρονοβόρες και απαιτούν μεγάλη εργαστηριακή υποδομή. Όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ενός πλήρους εξοπλισμένου εργαστηρίου, η χρήση τηλεμετρικών συστημάτων παρακολούθησης παρέχει συνεχόμενη ροή δεδομένων, η οποία μπορεί να αξιοποιείται άμεσα με το GIS. Το GIS έχει την δυνατότητα αποτίμησης της οικολογικής κατάστασης αλλά και της πρόβλεψης χωρικής εξάπλωσης των ρυπογόνων φορτίων με την χρήση μοντέλων παρεμβολής, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διαχείριση της.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα του Γ.Σ.Π. είναι η ταχύτητα του. Η εκτίμηση της οικολογικής κατάστασης της λίμνης μπορεί να θεμελιώνεται με την συλλογή ενός αριθμού παραμέτρων. Το Γ.Σ.Π. μπορεί να παρουσιάσει την διασπορά αυτών των παραμέτρων, αναλύοντας, αξιολογώντας και εξάγοντας σειρά συμπερασμάτων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις υπηρεσίες που λαμβάνουν αποφάσεις διαχειριστικών μέτρων.

Σε ότι αφορά τον έλεγχο του ευτροφισμού, μπορεί να γίνει με περιορισμό και έλεγχο του είδους και των ποσοτήτων των θρεπτικών αλάτων και ιδίως του φωσφόρου που παράγονται στη λεκάνη απορροής της και καταλήγουν σ' αυτή.

Απο την εμπειρία απο άλλες λίμνες φαίνεται ότι αρκετά χρόνια (μέχρι και 10) μπορεί να είναι αναγκαία να μεσολαβήσουν μεταξύ της περιόδου που επιτεύχθηκε η μείωση των εισερχόμενων φορτίων και του χρόνου που θα είναι ορατή μια μείωση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού. Καθόλη τη διάρκεια του απαιτούμενου αυτού χρόνου είναι αναγκαίο να γίνεται μόνιμη παρακολούθηση των φορτίων του

φωσφόρου, της συγκέντρωσης του στη λίμνη, της βιομάζας του φυτοπλαγκτού και των κυανοφυκών ιδιαίτερα, κάτι που δεν γίνεται στην Καστοριά.

Συνήθως μια τάση μείωσης της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου στην λίμνη είναι η πρώτη ένδειξη απόκρισης στην μείωση των εξωτερικών φορτίων. Όμως χρειάζεται να περάσουν χρόνια για να επιτευχθεί μια μείωση του ολικού φωσφόρου κάτω από το όριο που είναι αποτελεσματικό (συνχά κατά μια τάξη μεγέθους) για μείωση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού και αλλαγή στην επικράτηση.

Στην περίπτωση της λίμνης Καστοριάς όπου ο θεωρητικός χρόνος παραμονής του νερού είναι σχετικά μεγάλος (περίπου 2-3 χρόνια βάσει των εισροών και 6 περίπου χρόνια βάσει της μέσης απορροής στο ρέμα Γκιόλι) απαιτούνται συμπληρωματικές μετρήσεις των ροών του φωσφόρου από το ίζημα προς τη στήλη και αντίστροφα για να εκτιμηθεί η νέα ισορροπία και ο χρόνος υστέρησης.

Τα εξωτερικά φορτία φωσφόρου στην λεκάνη απορροής της λίμνης μπορούν να μειωθούν με την εφαρμογή γεωργικών πρακτικών φιλικών προς το περιβάλλον, την ανάπτυξη αποχετευτικών δικτύων όλων των παραλίμνιων οικισμών και την σύνδεση τους με τριτοβάθμιο βιολογικό καθαρισμό, την δημιουργία μια σειράς υδροδυναμικών έργων στα παρακείμενα ρέματα με στόχο την διευθέτηση των ρεμάτων και την αποτροπή των προσχώσεων.

Όσον αφορά τις φιλικές προς το περιβάλλον γεωργικές πρακτικές – βιολογικές καλλιέργειες, που συνοδεύονται με την εφαρμογή πρακτικών άρδευσης με στόχο την εξοικονόμηση νερού, έχουν την δυνατότητα να επιφέρουν την αύξηση της στάθμης της λίμνης και την μείωση των θρεπτικών φορτίων που εισέρχονται με την έκπλυση των εδαφών.

Τα υδρονομικά έργα που προτείνονται (Κωτούλας, 1993) και υπάρχει άμεση ανάγκη να υλοποιηθούν είναι:

1. Κατασκευή δεξαμενών καθίζησης
2. Κατασκευή φραγμάτων συγκράτησης υλικών
3. Κατασκευή φραγμάτων πλημμυρικών αιχμών
4. Φυτοτεχνικές διευθετήσεις , υδρογεωνομικές αναδασώσεις και αναθαμνώσεις.

Εφόσον ληφθούν μέτρα μείωσης των εξωτερικών φορτίων φωσφόρου, οι επεμβάσεις στα εσωτερικά φορτία φωσφόρου, μπορεί να θεωρηθούν συμπληρωματικές, έχοντας κύριο σκοπό την επιτάχυνση της απόκρισης της λίμνης σ' αυτή τη μείωση .

Η τεχνική απομάκρυνσης του ιζήματος με σύγχρονες τεχνικές απομάκρυνσης (χρήση βυθοκόρου) στη λίμνη Καστοριάς είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Το ίζημα πρέπει να απομακρυνθεί μέχρι εκείνο το βάθος που το ίζημα να έχει το χαμηλότερο περιεχόμενο σε φώσφορο. Ο φώσφορος είναι διαθέσιμος μέχρι και το βάθος των 25cm (Μουστάκα-Γουνή 2000) χωρίς να σημαίνει ότι δεν είναι διαθέσιμος και βαθύτερα. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να απομακρυνθεί ίζημα > 30cm για μια επιφάνεια της λίμνης που ανέρχεται σε > 30,000,000 τετραγωνικά μέτρα δηλαδή απομάκρυνση τουλάχιστον 9,000,000 m^3 ιζήματος.
- Το νερό που βρίσκεται στο ίζημα ανάμεσα στους κόκκους και είναι πολύ πλούσιο σε φώσφορο δεν πρέπει να έρθει σε επαφή με το νερό της λίμνης στη στήλη. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται χρήση μηχανημάτων με κατάλληλες τεχνικές προδιαγραφές .
- Η εναπόθεση του ιζήματος πρέπει να γίνει με κατάλληλο τρόπο και σε χώρους που με τις βροχές και τις εκπλύσεις των εδαφών δεν θα επανέλθει στην λίμνη.

Οποιαδήποτε όμως επέμβαση στο εσωτερικό φορτίο του φωσφόρου απαιτεί διεξοδική μελέτη και ενδεχομένως αρχικά κάποια πειραματική εφαρμογή.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλμπάνης Τρ., 2005. Ρύπανση & Τεχνολογία Προστασίας Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
- Αντωνόπουλος Β., 2003. Υδραυλική περιβάλλοντος και Ποιότητα επιφανειακών νερών, Εκδόσεις Γιαχούδη, 2003
- Βαφειάδης Π., 1983. Υδρογεωλογική μελέτη της λεκάνης Καστοριάς, Διδακτορική Διατριβή.
- Ecos ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΕΠΕ, 1997. Πρόγραμμα αντιμετώπισης ειδικών περιβαλλοντικών προβλημάτων – Οριοθέτηση του υδροβιότοπου λίμνης Καστοριάς και ευρύτερης περιοχής του.
- Ζανάκη Κ., 2001. Έλεγχος Ποιότητας Νερού, Εκδόσεις Ιων.
- Ζαρκάδας Π., 2005. Διαχείριση των Υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς και προσδιορισμός του Υδατικού της Ισοζυγίου, Διπλωματική Εργασία, Πρόγραμμα Σπουδών Επιλογής (ΠΣΕ), Τμήμα Αγροτικής Ανάπτυξης και Διαχείρισης Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Ζαρκάδας Π., Μαργώνη Σ., Ψιλοβίκος Αρ., Δαλέζιος Ν., 2005. Εκτίμηση και Μοντελοποίηση του Κίνδυνου Διάβρωσης στη Λεκάνη Απορροής του Ξηροποτάμου Καστοριάς με Χρήση ΓΣΠ». Πρακτικά της 1^{ης} Πανελλήνιας Ημερίδας της Επιτροπής Γεωμορφολογίας & Περιβάλλοντος της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, σελ. 42 – 53.
- Κουτσόπουλος Κ., 2005. Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και ανάλυση χώρου, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Κωτούλας Δ., 1994. Μελέτη για την εξυγίανση και αξιοποίηση της Λίμνης Καστοριάς, Προστασία της λίμνης από Προσχώσεις. Ερευνητικό έργο ΑΠΘ.

- Μαμάσης Ν. & Κουτσογιάννης Δ., 1999. Προχωρημένη υδρολογία. Κατακρημνίσματα και χωρική μεταβλητότητά τους. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μουστάκα-Γούνη Μαρία, 2000. Διερεύνηση υδροβιολογικών παραμέτρων στη λίμνη της Καστοριάς. Επιλογή βέλτιστης μεθόδου αποκατάστασης της οικολογικής ισορροπίας, Ερευνητικό Πρόγραμμα Επ. Ερευνών ΑΠΘ.
- Μήτσιου Κ., Αντωνόπουλος Β., & Παπαμιχαήλ Δ., 1999. Στατιστική διερεύνηση των χρονοσειρών παραμέτρων ποιότητας του νερού του ποταμού Στρυμόνα. Υδροτεχνικά, Τεύχος 9, σελ. 59 – 74.
- Οικονομόπουλος Α., 1994. Εφαρμογή μοντέλου ποιότητας και διαχείριση πηγών ρύπανσης, Ερευνητικό Πρόγραμμα Επ. Ερευνών Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
- Περγαντής Φ., 1994. Μελέτη προστασίας ορνιθοπανίδας και διαχείρισης περιφερειακής ζώνης καλαμώνων, Ερευνητικό Πρόγραμμα Επ. Ερευνών Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
- Σίνης Α., 2005. Λιμνολογία. Εκδόσεις University Studio Press.
- Τολίκας και συνεργάτες 2000. Προσδιορισμός παροχών φερτών υλών και ποιότητας νερού των χειμάρρων ρεμάτων της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς-Διερεύνηση Τάσεων και εφαρμογή εναλλακτικών σεναρίων μείωσης φορτίου. Ερευνητικό έργο του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου.
- Φιλίππου Χρ., 2005. Ποιοτική διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής της λίμνης της Καστοριάς και μοντέλα γεωγραφικής κατανομής της ρύπανσης. Διπλωματική Εργασία, Πρόγραμμα Σπουδών Επιλογής (ΠΣΕ), Τμήμα Αγροτικής Ανάπτυξης και Διαχείρισης Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

- Χριστοδουλάκη Σ., 2003 Διαχείριση Υδατικών Πόρων λεκανών απορροής Ηρακλείου Κρήτης. Διδακτορική Διατριβή.
- Ψιλοβίκος Α., Αλμπανάκης Κ., Μαργώνη Σ., Ψιλοβίκος Αρ., Ιωαννίδης Δ. & Μακρυγιώργος Χ., 2002. Συμβολή στη διαχείριση και στην περιβαλλοντική παρακολούθηση του ποτάμιου συστήματος του Νέστου». Πρακτικά του 6^{ου} Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας, Τόμος ΙΙ, σελ. 505 – 512, Θεσσαλονίκη.
- Ψιλοβίκος Αντ, Αλμπανάκης Κ., Μαργώνη Σ., Ψιλοβίκος Αρ .& Μακρυγιώργος Χ., 2003. Ορισμένα στοιχεία της λειτουργίας του συστήματος REMOS στο δέλτα του Νέστου για τον ποσοτικό και ποιοτικό έλεγχο των υδατικών πόρων μετά τη λειτουργία των υδροηλεκτρικών έργων. Πρακτικά του 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, σελ.257-264, Θεσσαλονίκη.
- Ψιλοβίκος Αρ., Μαργώνη Σ., Βαβλιάκης Ελ., Ψιλοβίκος Αντ., 2004. Παρακολούθηση και προσομοίωση της γεωγραφικής κατανομής της ραγδαίας βροχόπτωσης της 28–29/11/2001 στη Σάμο και συμβολή στην ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών της πόρων. Πρακτικά του 7^{ου} Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου, Τόμος Ι, σελ. 450 – 457, Μυτιλήνη.
- Ψιλοβίκος Αντ., Ψιλοβίκος Αρ. & Μαργώνη Σ., 2004. «Μαθηματική προσομοίωση της πρόσχωσης στο υδάτινο περιβάλλον του υδροβιότοπου της λίμνης Κερκίνης από τα φερτά υλικά του ποταμού Στρυμόνα». Πρακτικά του 7^{ου} Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου, Τόμος Ι, σελ. 512 – 519, Μυτιλήνη.
- Ψιλοβίκος Αρ., 2005. Η συμβολή της παρακολούθησης (monitoring) στην ορθολογική διαχείριση και την πρόληψη περιβαλλοντικών κινδύνων στο

διασυννοριακό ποταμό Νέστο. Η προοπτική για την εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60». *ΥΔΡΟΤΕΧΝΙΚΑ*, Τόμος 15, Σελ. 87 – 102.

- Ψιλοβίκος Αρ., Φιλίππου Χρ., Μαργώνη Σ., Ματζαφλέρη Ν., Κούγκολος Αθ., 2006. «Σύγκριση δυο Αλγορίθμων Χωρικής Προσομοίωσης των Ποιοτικών Παραμέτρων των Υδάτων της Λίμνης της Καστοριάς με τη Χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών». Πρακτικά του 1^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου με τίτλο : «*Μονάδες Επεξεργασίας υγρών αποβλήτων μικρής κλίμακας*», σελ. 25 – 32, Πορταριά Πηλίου.
- Arc View 9 G.I.S, Help Manual 2006.
- Antonopoulos V., Papamichail D. & Mitsiou K., 2001. Statistical and trend analysis of water quality and quantity data for the Strymon River in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4), 679 – 691.
- Arts M.T, Robarts R.D, Kasai F., Waiser M.J, Tumber V.P, Plante A.J, Rai H. and Lange H., 2000. The attenuation of ultraviolet radiation in high dissolved organic carbon waters of wetlands and lakes on the northern Great Plains. *Limnology and Oceanography*, 45:292-299
- APHA, American Public Health Association (1985), Standard Methods for the examination of water and wastewater, 16 th Edition, Washington.
- APHA, American Public Health Association (1992), Standard Methods for the examination of water and wastewater, 18 th Edition, Washington.
- Beklioglou, M. 1999. A review on the control of eutrophication in deep and shallow lakes. *Turkish Journal of Zoology*. 23:327-336.
- Bishop A.B. and Grenney W.J, 1976. Coupled optimization-simulation water quality model. *Environmental Engineering, ASCE*, 102:1071-1086.

- Bronmark C. & Hansson L.A., 1998. The biology of Lakes and Ponds, Oxford University Press.
- Box G., Jenkins G.N., 1976. Time series analysis: Forecasting and Control. Holden Day Inc., Oakland, California, 532 pp.
- Carvalho, L., Bennion, H., Dawson, H., Furse, M., Gunn, I., Hughes, R., Johnston, A., Maitland P., May, L., Mointetith, D., Luckes, S., Taylor, R., Trimmer, M. and Winder, J. 2002. Nutrient conditions for different levels of ecological status and biological quality in surface waters (Phase I). Environment Agency, Almondsbury, Bristol. R&D Technical Report P2-260/4.
- Chambers, P.A., Guy, M., Roberts, E.S., Charlton, M.N., Kent R., Gagnon C., Grove G., and Foster N. 2001. Nutrients and their impact on the Canadian environment. Agriculture and Agri-Food Canada, and Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario.
- Chapra S.C., 1997. Surface water-quality modelling Mc Graw-Hill, New York, 844pp.
- Dahmen E.R. and M.J. Hall, 1990. Screening of Hydrological Data: Tests for Stationarity and Relative Consistency, ILRI Publication No.49, Wageningen.
- Dillon, P.J and Rigler, F.H., 1975. A simple method for predicting the capacity of lake for development based on lake trophic status. *J Fish Res. Board. Can.* 32, 1519-1531.
- Dingman L., 1994. Physical Hydrology, Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- ESRI, ARC-VIEW, 1996. Advanced Spatial Analysis using raster and vector data.
- European Community, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework

for the Community action in the field of water policy. In Official journal of the European Communities, 22-12-2000, L 327/1-72.

- Frisk T., Niemi J.S and Kinnunen K.A. 1981. Comparison of statistical phosphorus-retention models, *Ecol. Modelling*, 12, 11-27.
- Greek Parliament (2001b). Reply by the Minister for the Environment, Physical Planning and Public Works to written question 1344/10-9-2001.
- Helsel D.R. and R.M. Hirsch, 1992. *Statistical Methods in Water Resources*, Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands.
- Heinonen P., Ziglio G., Van der Beken A., 2000. *Hydrological and Limnological Aspects of Lake Monitoring*.
- Hietala J., Vakkilainen, K. and Kairesalo, T. 2004. Community resistance and change to nutrient enrichment and fish manipulation in vegetated lake littoral *Freshwater Biology*, 49(12) 1525-1537.
- Hirsch R., Slack J. & Smith R., 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18 (1), 107-121.
- Jeppesen, E., Jensen, J.P., Sondergaard, M. and Lauridsen, T.L. 2005. Response of fish and plankton to nutrient loading reduction in eight shallow Danish lakes with special emphasis on seasonal dynamics. *Freshwater Biology*, 50(10): 1616-1627.
- Kalff, J. 2002. *Limnology*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Lambert W., Sommer U., 1997. *Limnology*, Oxford University Press.
- Lampert W., Rothhaupt K.O and Von Elert E., 1994. Chemical induction of colony formation in a green alga (*Scenedesmus acutus*) by grazers (*Daphnia*). *Limnology and Oceanography*, 39, 1543-50.

- Lanaras T., Tsitsamis S., Chlichia C., Cook C. M., 1989. Toxic cyanobacteria in Greek freshwaters. *J.Appl.Phycol.* 1, 67-73.
- Lindell M.J., Graneli W. and Tranvik, L.J., 1995. Enhanced bacterial growth in response to photo chemical transformation of dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*, 40, 195-9.
- Lappalainen K.M., 1974. Kehitysarviot eri Kuormitasvaihtoehdolla-Kallveden reitti ja Haukivesi (Water quality predictions with different loading alternatives-the watercourse of Lake Kallavesi and Lake Haukivesi). Report No59, National Board of Waters, Helsinki, Finland, 1-84 (In Finnish).
- Makridakis S., Wheelwright S., and Megee V., 1986. *Forecasting: Methods and Application*, 2nd edition. John Willey and Sons, New York.
- Mazumder A., Taylor W., Queen Mc and Lean D., 1990. Effects of fish and plankton on lake temperature and mixing depth. *Science* 247, 312-15.
- Nurnberg, G.K. 1996. Trophic state of clear and colored, soft-and hardwater lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton and fish. *Lake and Reservoir Management*. 8:17-30.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), 1982. *Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control*, OECD cooperative programme on monitoring of inland waters (eutrophication control). Environment Directorate OECD, Paris, France.
- Premazzi G. and Chiaudani G. 1992. *Ecological Quality of Surface Waters, Quality Assessment Schemes for European Community Lakes*. European Communities Commission, EUR 14563, Ecological Quality of Surface Waters. Environmental Quality of Life Series, Environment Institute, University of Milan, Milan Italy.

- Psilovikos Ar., Margoni S & Psilovikos Ant., 2006. Simulation and Trend Analysis of the Water Quality Monitoring Daily Data in Nestos River Delta. Contribution to the Sustainable Management and Results for the years 2000 – 2002. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol 116, No 1 – 3, pp 543 – 562.
- Ripley B.D, 1987. Stochastic Simulation, Wiley, New York.
- Sagrario, Jeppesen E, Søndergaard, Jensen, Lauridsen and Laudkildehus, 2005. Does high nitrogen loading prevent clear-water condition in shallow lakes of moderately high phosphorus concentration. *Freshwater Biology*. 50(1): 27-41.
- Schindler D.W, 1974. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implication for lake management. *Science*, 184, 897-9.
- Schnoor J., 2003. Περιβαλλοντικά μοντέλα Τύχη και Μεταφορά Ρύπων στον Αέρα, Νερό και Έδαφος, Μετάφραση από Γκέκα Β., Εκδόσεις Τζιόλα.
- Søndergaard, M., Jeppesen, E., and Jensen, J.P. 2003. Internal phosphorus loading and the resilience of Danish Lakes. *Lake Line*. 23(1): 17-20.
- Thomann, R.V. and Mueller, J.A. 1987. Principles of surface water quality modelling and control. Harper Collins Publishers Inc., New York, New York.
- Tsounis, Zervou, Hatzibiros & Andreadakis, 2002. An environmental database for status of freshwaters in Greece, *Global Nest the International Journal*, Vol. 4 (1), pp 1 – 14.
- United States Environmental Agency (USEPA). 2000. Nutrient criteria technical guidance manual Lakes and reservoirs. Office of water, Office of Science and Technology, USEPA, Washington, D.C. EPA-822-B00-001.

- Vollenweider R.A., 1968. Scientific Fundamentals of the Eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in Eutrophication, OECD, Paris.
- Vollenweider R.A & Kerekes J., 1982. Eutrophication of waters. Monitoring, Assessment and Control, OECD, Paris.
- Wetzel R.G., 1983. Limnology, 2nd edn. Saunders, Philadelphia.
- Wetzel R.G., 2001. Limnology Lake and River Ecosystems. Elsevier Academic Press.
- Wetzel R.G., Likens G.E., 1991. Limnological analyses, 2nd. Springer-Verlag, New York.

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

- <http://www.lakewinnipeg.org/web/downloads/Nutrient>
- www.esri.com

Abstract

Lake Orestiada is a shallow lake and an eutrophic ecosystem located in NW Greece, which during last decades has been influenced by a lot of man-made impacts such as sewage discharge, water level fluctuation, e.t.c. Water quality for physicochemical and biological parameters was monitored seasonally in three sampling-stations at the beginning and in five sampling-stations at last. The results of the measurements were inserted in the a GIS environment and the distribution of the parameters was figured in two-dimensioned maps. The spatial variation of the nitrate, phosphate, ammonia-nitrogen, temperature and dissolved oxygen was described seasonally. As a result of the assessing monitoring data would be a hydrodynamic and ecological modeling in order to find out possible co effects, to understand and predict the behaviour of the lake's ecosystem. This can lead us to characterize the ecological situation of the lake, to assess protective measures, to maintain the water quality and even to restore the lake.

Key words Lake Kastoria, Eutrophication, Water Quality, Monitoring, Simulation Model, Management, Restoration.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ



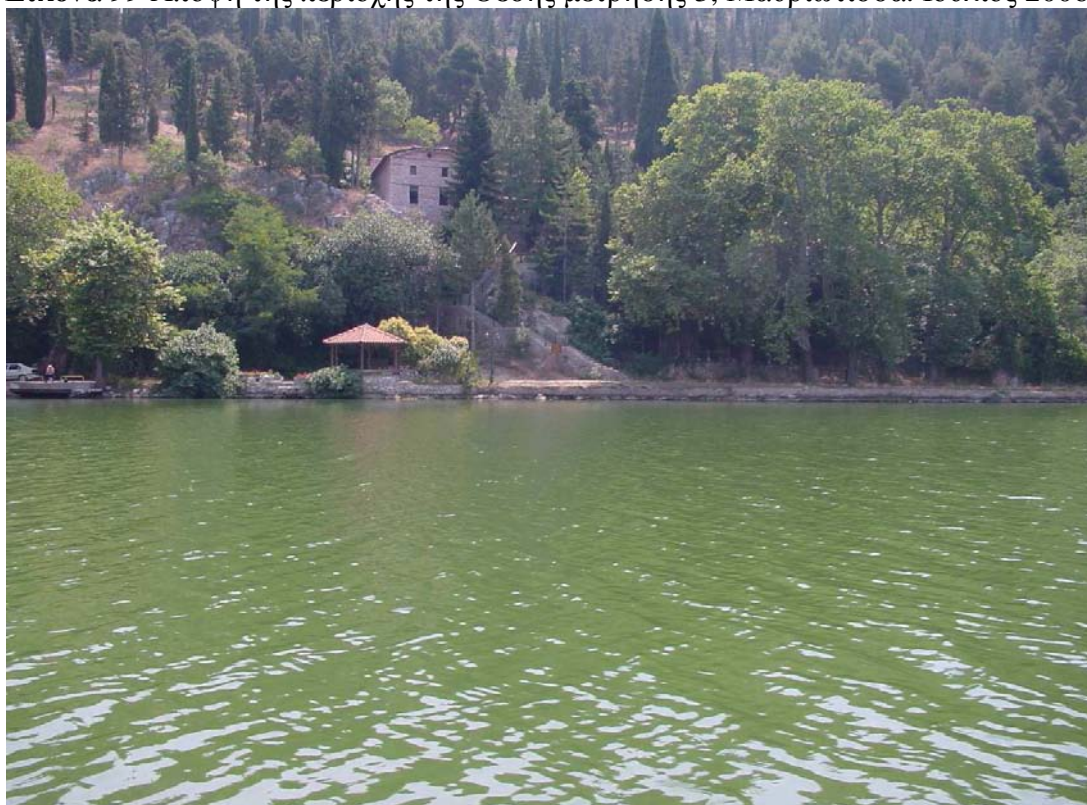
Εικόνα 97 Άποψη της περιοχής της Θέσης Μέτρησης 1, Σιούτιστα. Ιούλιος 2006.



Εικόνα 98 Άποψη της περιοχής της Θέσης Μέτρησης 2, Ξηροπόταμος. Ιούλιος 2006.



Εικόνα 99 Άποψη της περιοχής της Θέσης μέτρησης 3, Μαυριώτισσα. Ιούλιος 2006



Εικόνα 100 Άποψη της περιοχής της Θέσης Μέτρησης 4, Παραλία Αη-Σωτήρα
Ιούλιος 2006.



Εικόνα 101 Άποψη της περιοχής της Θέσης Μέτρησης 5, Σταυρός Ν. Παραλία.
Απρίλιος 2006



Εικόνα 102 Άποψη της υδρόβιας βλάστησης και της υψηλής διαπερατότητας στα
αβαθή της λίμνης.